

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO PER VARIANTE ALLO STRUMENTO URBANISTICO GENERALE – ART. 8 DPR 160/2010

Relazione Illustrativa

Regione Veneto

Comune di Spresiano (TV)

Regione del Veneto	Soggetto realizzatore Dott. Geol. Enrico Farinatti 	Aprile 2021
--------------------	---	-------------

Sommario

1. INTRODUZIONE.....	3
2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.1 Classificazione sismica del territorio comunale.....	4
2.2 Zonazione sismogenetica.....	6
2.3 Definizione della pericolosità di base.....	8
2.4 Analisi storica.....	9
2.4.1 Sismogenetica e correlazioni con le strutture.....	12
2.5 Faglie attive e faglie capaci.....	13
3. INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	15
3.1 Prove penetrometriche DP.....	15
3.2 Indagini sismiche.....	16
3.3 Cenni sulle misure passive del rumore sismico ambientale (HVSR).....	16
3.4 Cenni sulle misure di sismica superficiale con le metodologie Masw e Re.Mi combinate.....	21
3.5 Cenni sulle misure tomografiche elettriche (ERT).....	40
3.4.1 Analisi delle risultanze.....	45
4. MICROZONAZIONE SISMICA.....	50
4.1 Introduzione.....	50
5. MODELLAZIONE NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE DI TERZO LIVELLO.....	56
5.1 Premessa.....	56
5.2 Modellazione sismica.....	57
5.2.1 Determinazione dell'accelerazione massima di riferimento.....	57
5.2.2 Determinazione Scelta progettuale.....	57
5.2.3 Analisi di disaggregazione.....	57
5.2.4 Estrazione Input Sismici.....	59
5.2.5 Modello sismostratigrafico.....	61
5.2.6 Analisi.....	62
5.2.7 Verifica alla liquefazione.....	65
6. CONCLUSIONI FINALI.....	71

ALLEGATI:

Allegato 1 - Elaborati prove penetrometriche

Allegato 2 - Curve di decadimento materiali

Allegato 3 - Accelerogrammi di input (SLV ed SLO)

Allegato 4 - Accelerogrammi di output (SLV ed SLO)

Allegato 5 - Spettri medi di output (formato digitale)

1. INTRODUZIONE

Lo scrivente, su incarico dello Studio Tecnico Arch. Emanuele Gaspa e per conto di Tecno Logica srl, ha redatto il seguente lavoro in risposta alla richiesta della Regione Veneto (Protocollo n. 127779/88 del 19/03/2021) che chiede uno Studio di Microzonazione Sismica di terzo livello, per il rilascio del parere di compatibilità sismica, secondo quanto previsto dalla normativa regionale DGR 1572/2013, per procedere ad una variante allo Strumento Urbanistico Generale, ai fini dell'ampliamento dello stabilimento produttivo della ditta Tecno Logica srl.

Nella Deliberazione della Giunta Regionale n. 1572 del 03/09/2013 che titola: "Definizione di una metodologia teorica e sperimentale per l'analisi sismica locale a supporto della pianificazione. Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica (DGR 71/2008, DGR 2877/2008 e D. lgs. 163/2006 e abrogazione DGR n. 3308/08)" sono appunto riportate le Linee Guida Regionali per la redazione degli studi di microzonazione sismica, durante le fasi di progettazione degli strumenti urbanistici. Le linee guida costituiscono una direttiva alla quale attenersi per la riduzione del rischio sismico (RS), che può così essere definito:

$$RS = \text{Pericolosità sismica} \times \text{Esposizione urbanistica} \times \text{Vulnerabilità dei centri urbani e delle opere}$$

Lo scopo primario di uno Studio di Microzonazione Sismica, è quello di fornire dei criteri per l'individuazione delle aree soggette ad effetti di amplificazione locale ed instabilità in caso di terremoto in maniera da orientare le scelte, nella fase di progettazione urbanistica, verso aree a minore pericolosità sismica.

Secondo la DGR1572/2013, uno studio di Microzonazione Sismica, prevede tre livelli di approfondimento:

1°LIVELLO: si applica in sede di P.A.T., consente di delineare gli scenari della pericolosità sismica ed identifica, nella carta delle MOPS, le parti del territorio comunale suscettibili di effetti sismici locali: amplificazione del moto sismico, cedimenti, instabilità dei versanti, liquefazione, rottura del terreno, ecc.;

2°LIVELLO: si applica in sede di P.I. a tutte le parti del territorio suscettibili di amplificazione sismica individuati nella precedente fase e per le quali si prevedono trasformazioni urbanistiche del territorio che comportano un incremento dei carichi urbanistici/insediativi e per il territorio compreso nel perimetro del "centro abitato" così come previsti dalla normativa vigente;

3°LIVELLO: si applica in sede di PI per le scelte di trasformazione urbanistica nelle aree con particolari criticità geologiche, geomorfologiche e geotecniche ed inoltre nelle aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico.

Essendo il Comune di Spresiano provvisto di uno Studio di Microzonazione Sismica, redatto dal dott. Geol. Livio Sartor ed approvato in data 05.02.2015 prot. n.48643/70.07.14.01.00, per quanto riguarda le considerazioni sulla pericolosità sismica e l'inquadramento geologico, si rimanda a tale studio.

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Classificazione sismica del territorio comunale

Con l'entrata in vigore l'8/5/2003 della OPCM n. 3274, il territorio italiano è stato suddiviso in quattro zone sismiche; con l'introduzione della quarta zona sismica, tutto il territorio nazionale viene definito come sismico. Il Consiglio Regionale del Veneto, con delibera n. 67 del 3/12/2003, ha fatto proprio e approvato il nuovo elenco dei comuni sismici del Veneto e il Comune di Spresiano è stato classificato in Zona Sismica 3 cioè in questa zona possono verificarsi forti terremoti ma rari, con valori di $a_g = 0.150$.

Con l'OPCM n. 3519 del 28.04.2006 e il DGRV n. 71/2008, viene approvata la nuova "Mappa di pericolosità sismica del territorio Nazionale" espressa in termini di accelerazione massima al suolo ($a_g \max$) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni) riferita a suoli rigidi ($V_s > 800 \text{m/sec}$). Il valore di a_g , per il Comune di Spresiano, come si può vedere dalla fig.1, varia da 0.150g a 0.200g.

Infine con la DGRV n. 1823 del 29/12/2020, viene approvata la nuova zonizzazione sismica del Veneto che, in sostanza, uniforma gli aspetti amministrativi con gli aspetti tecnici, per cui il comune di Spresiano viene annoverato tra le zone sismiche 2 (medio-alta sismicità).

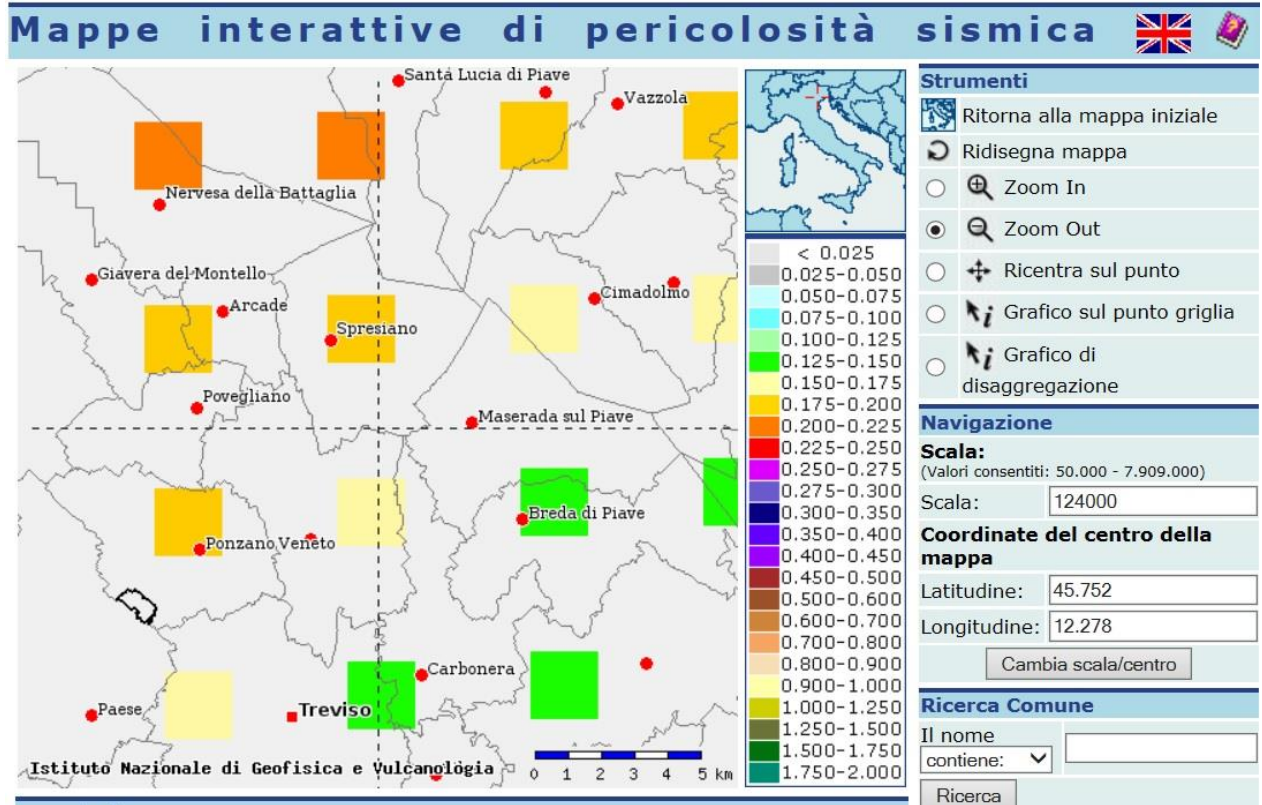


Fig.1 Mappa della pericolosità sismica dell'area –I quadrati indicano il nodo con espressi i valori di accelerazione (Fonte–Mappe interattive dell'Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia - <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>)

Come mostrato in fig.1, la zona in studio coincide con il nodo sismico n.11194, le cui caratteristiche di accelerazione a_g , sono indicate nella tabella di fig.2.

Frequenza annuale di superamento	a(g) (Coordinate del punto lat: 45.7788, lon: 12.2731, ID: 11194)		
	16° percentile	50° percentile	84° percentile
0.0004	0.3226	0.3646	0.4345
0.0010	0.2261	0.2514	0.3095
0.0021	0.1665	0.1873	0.2294
0.0050	0.1135	0.1288	0.1534
0.0071	0.0958	0.1090	0.1271
0.0099	0.0818	0.0930	0.1060
0.0139	0.0697	0.0782	0.0869
0.0200	0.0568	0.0648	0.0692
0.0333	0.0422	0.0498	0.0514

Fig.2 Valori di accelerazione al suolo per i nodi indicati nella mappa e ricadenti nella zona in studio. (Fonte–Mappe interattive dell'Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia–<http://esse1-gis.mi.ingv.it>)

I valori indicati dovranno essere utilizzati nelle nuove progettazioni ai sensi della normativa vigente.

2.2 Zonazione sismogenetica

In ottemperanza all'OPCM 3274/03 l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (di seguito denominato INGV) ha realizzato una nuova zonazione sismogenetica del territorio italiano, chiamata ZS9, risultato di modifiche, accorpamenti ed elisioni delle numerose zone di ZS4 e dell'introduzione di nuove zone. Il territorio comunale di Spresiano (TV) si trova collocato alcuni chilometri a sud della zona sismo genetica 905 (fig.3), unione delle zone 4,5 e 6 di ZS4.

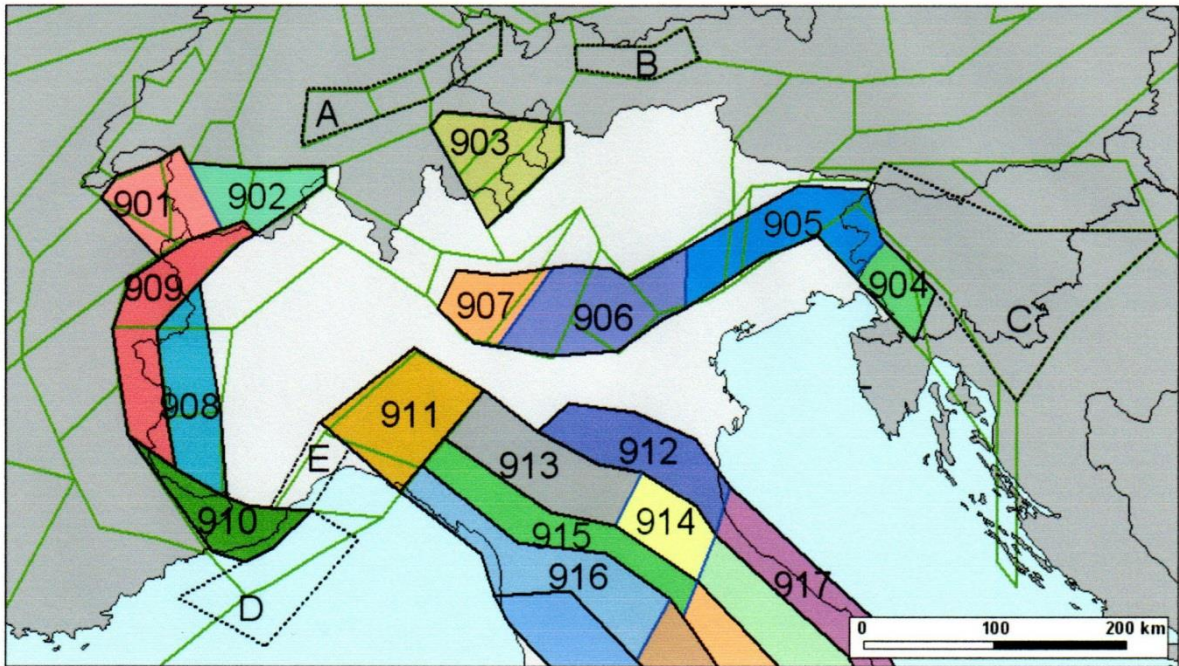


Fig.3 Zonazione sismogenetica ZS9 per il Nord Italia (bordi in nero e blu) a confronto con la zonazione adottata dal progetto SESAME (bordi verde, da Jiménez et al., 1991)

In questa zona si osserva la massima convergenza tra la placca adriatica e quella europea; essa è caratterizzata da strutture a pieghe sud vergenti del sud alpino orientale e faglie inverse associate (fig.4).

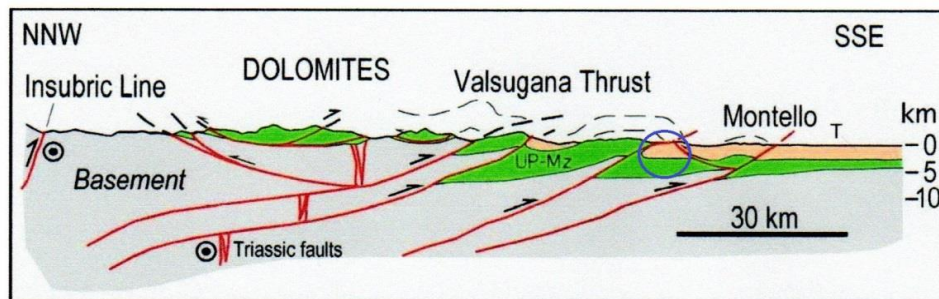


Fig.4 Sezione del ventaglio embriciato delle Alpi Meridionali, dalla Val Pusteria alla pianura veneta (da Doglioni & Carminati, 2008). La zona in studio è cerchiata in blu.

Per quanto riguarda la profondità efficace, ossia la profondità alla quale avviene il maggior numero di terremoti, sulla base dei cataloghi strumentali e di alcune assunzioni di partenza, il gruppo di lavoro dell'INGV, ha attribuito alla zona in studio una profondità efficace compresa tra 8-12 km ed una magnitudo attesa massima di $M_{wMax} = 6.6$.

2.3 Definizione della pericolosità di base

Secondo l'approccio più comune, adottato anche dalle normative italiane, la pericolosità sismica di un sito viene indicata attraverso il valore di accelerazione orizzontale (PGA) che ha una determinata probabilità di essere superato in un intervallo di tempo.

Con l'OPCM 3274/2003 si è avviato in Italia un processo per la stima della pericolosità sismica secondo il metodo classico di probabilità indipendente dal tempo di Cornell. Tale metodo prevede l'individuazione delle sorgenti sismiche e la suddivisione del territorio in zone con supposta uniforme probabilità di essere epicentro di futuri terremoti. Per ciascuna zona viene calcolato il tasso medio di terremoti di una certa magnitudo e il passaggio da magnitudo alla sorgente ad accelerazione risentita al sito, è effettuato attraverso opportune leggi di attenuazione. La probabilità di avere una certa PGA in un sito è data infine dal prodotto tra la probabilità condizionata di avere quella PGA da un terremoto di magnitudo M avvenuto a distanza R dal sito e le probabilità indipendenti che si verifichino eventi di quella M a quella R , integrando su tutti i possibili valori di M e R e per tutte le sorgenti della zona.

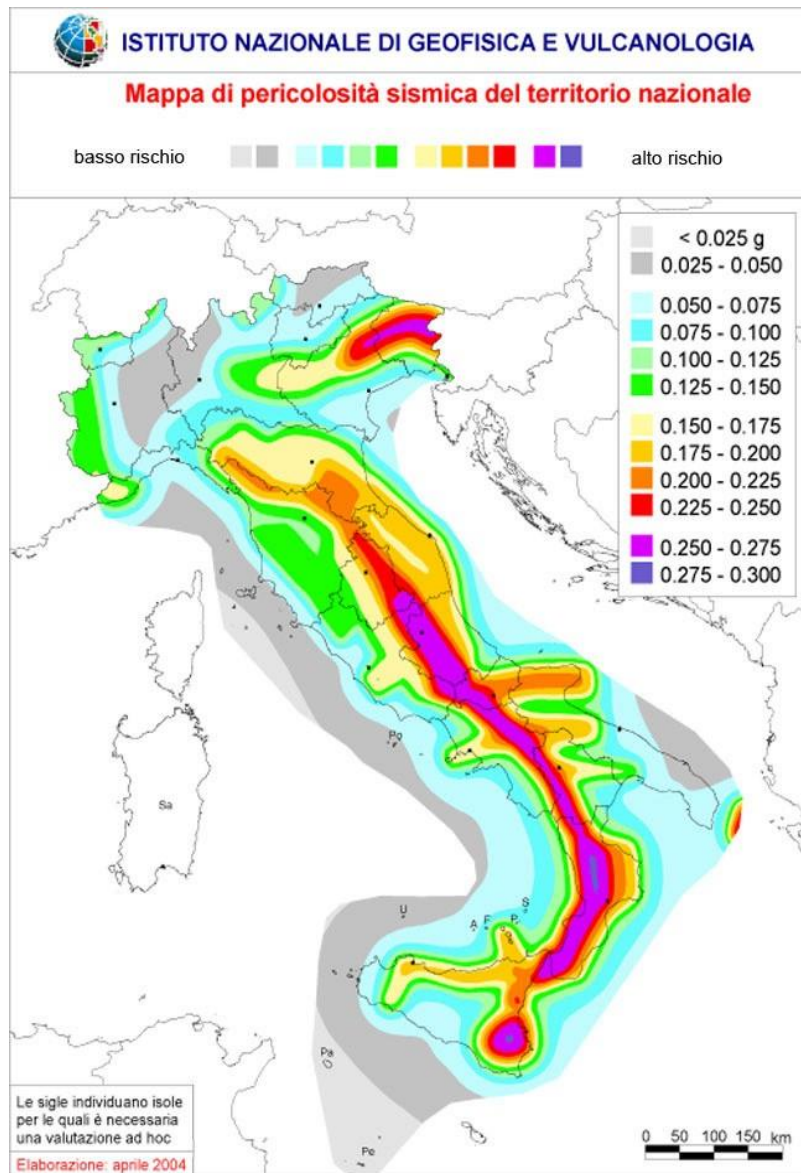


Fig.5 Mappa Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale

2.4 Analisi storica

Dall'analisi del catalogo CPTI15 (catalogo dei terremoti pubblicato nel 2016) e del sito ISIDE (Italian Seismological instrumental and parametric database) possiamo rilevare la presenza dei terremoti aventi epicentro entro un raggio di circa 30 km dal centro abitato di Spresiano e con magnitudo $M_w \geq 4.5$, dopo il 1300:

- anno 1695 nell'Asolano con $M_w=6.40$;
- anno 1756 in Treviso con $M_w=4.87$;
- anno 1860 nel Valdobbiadene con $M_w=4.92$;
- anno 1861 nel comune di Riese PioX con $M_w=4.63$;

- anno 1887 nell'Asolano con $M_w=4.82$;
- anno 1895 nel Valdobbiadene con $M_w=4.85$;
- anno 1900 nel Valdobbiadene con $M_w=5.05$;

Il sisma con maggiore intensità negli ultimi 2000 anni, con epicentro entro i 30 km circa di raggio è Avvenuto il 25.02.1695 nell'asolano (il CPT115 lat.45,861, long.11,910 poco a Sud del cimitero di Cavaso del Tomba) con intensità epicentrale di 10 e magnitudo $M_w=6.4\pm 0.10$.

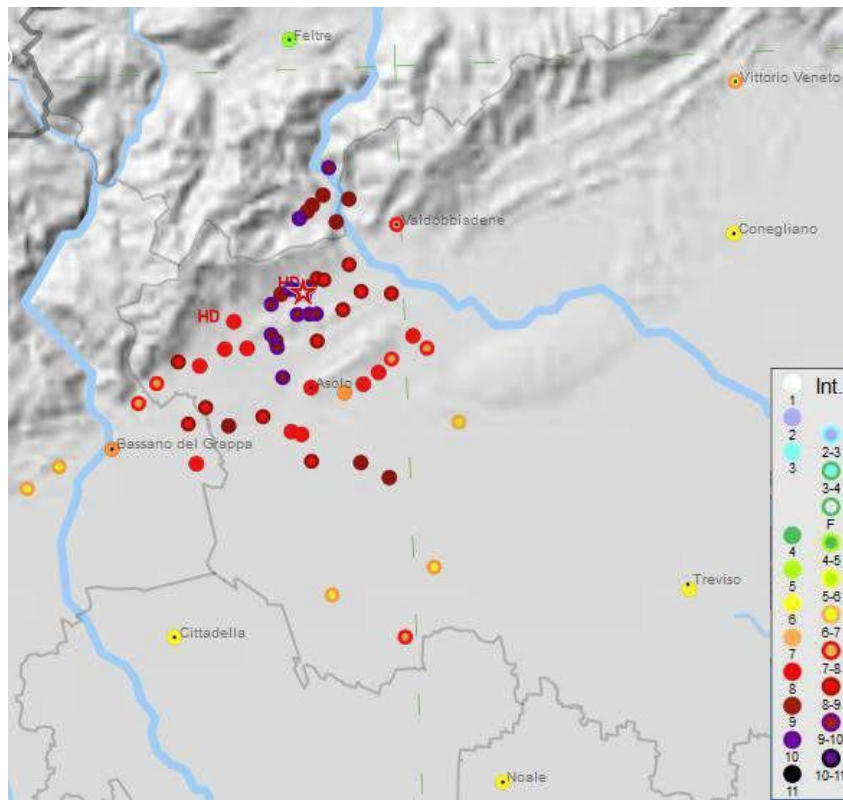


Fig. 6 Distribuzione delle intensità dal terremoto del 1695 con epicentro a Cavaso del Tomba (TV).

1695 febbraio 25 05:30
Asolano

EqID: 16950225_0530_000

	Rif	Lat	Lon	Io	Mw	ErMw	Profond.
★	CPTI15	CAMAL012	45.861 11.910 MM	10	6.40 ± 0.10	Mdm	
□	Macro	CAMAL012	45.861 11.910 bx0	10	6.40 ± 0.10	bxn	

MOP set di Camassi et al., 2012 (CAMAL012)

NMDP 107 Imax 10 MCS

PlaceID	Località	Sc	Lat	Lon	Int
IT_25974	Alano di Piave		45.907	11.909	10
IT_26825	Cavaso del Tomba (Canlezza)	MS	45.863	11.899	10
IT_26824	Bocca di Serra		45.847	11.915	9-10
IT_72480	Foss		45.827	11.885	9-10
IT_26826	Costalunga		45.847	11.904	9-10
IT_26706	Pagnano		45.808	11.889	9-10
IT_27274	Possagno		45.854	11.881	9-10
IT_26660	Vas		45.938	11.937	9-10
IT_26827	Castelcies		45.847	11.921	9-10
IT_72481	Cárpene		45.835	11.880	9-10
IT_25875	Campo		45.915	11.921	9
IT_27501	San Zenone degli Erzelini		45.779	11.839	9
IT_27515	Segusino		45.918	11.954	9
IT_26407	Quero Vas (Quero)	MS	45.921	11.931	9
IT_25879	Fener		45.904	11.942	9
IT_26799	Castelcuoco		45.831	11.884	9
IT_26694	Caselle		45.743	11.981	9
IT_26689	Altivole		45.753	11.956	9
IT_26828	Obledo		45.860	11.890	9
IT_25876	Colmirano		45.911	11.916	9
IT_72477	Eremito di S.Giorgio al Pavolon	IS	45.867	11.898	MD
IT_72478	Sant. della Beata Verg. del C		45.848	11.825	MD
IT_26831	Granigo		45.869	11.923	8-9
IT_72476	Castelli		45.849	11.945	8-9
IT_27249	Curegna		45.860	11.962	8-9
IT_26829	Virago		45.868	11.929	8-9
IT_26830	Vettorezzi		45.864	11.916	8-9
IT_24920	Mussolente		45.781	11.803	8-9
IT_26698	San Vito		45.755	11.912	8-9
IT_27139	Monfumo		45.830	11.921	8-9
IT_27497	Liedolo		45.791	11.819	8-9
IT_27250	Federabba	MS	45.877	11.952	8-9
IT_26982	Fonte (Oné)	MS	45.784	11.870	8-9
IT_26722	Borso del Grappa		45.820	11.796	8-9
IT_27247	Onigo		45.858	11.989	8-9
IT_26929	Crespano del Grappa		45.827	11.836	8
IT_27220	Paderno del Grappa		45.827	11.858	8
IT_72479	Pradazzi		45.774	11.895	8
IT_72478	Villa d'Asolo		45.772	11.904	8
	Stagiante	UL			8
IT_24915	Casoni		45.756	11.809	8
IT_26724	Sant'Eulalia		45.817	11.815	8
IT_27213	Fietta		45.844	11.847	8
IT_26925	Cornuda		45.831	12.007	8
IT_27078	Coste		45.802	11.941	8
IT_26705	Asolo		45.801	11.914	8
IT_27081	Maser		45.809	11.975	8
IT_24944	Nogarè		45.823	12.019	7-8

Tab.1 - Distribuzione delle intensità dal terremoto del1695 con epicentro a Cavaso del Tomba (TV).

2.4.1 Sismogenetica e correlazioni con le strutture

La genesi dinamica del territorio comunale è dettata dalle strutture tettoniche descritte di seguito.

Nel Permiano tutta l'area dolomitica è soggetta ad una fase di rifting che la rompe in horst e graben di direzione circa N-S e faglie di trasferimento di direzione N70-100E; questa fase prosegue in modo estremamente intenso nel Triassico, con un regime mediamente trans tensivo (2-4 km di subsidenza). La tettonica distensiva perdura per tutto il Lias; la subsidenza termica o tettonica si attiva poi fino al Cretacico Inferiore. Nel Paleogene inizia la vera e propria inversione compressiva, con la formazione di sovrascorrimenti WSW- vergenti, correlabili regionalmente alla Catena Dinarica. Il fronte taglia obliquamente le Dolomiti Centrali e, rigettato dalla Linea della Valsugana, riprende verso il Friuli lasciando in pratica incolumi le Prealpi Venete. Nel Neogene, infine, tutta la precedente strutturazione viene ritagliata e piegata dalla compressione SSE-vergente subalpina.

Le Alpi Venete sono quindi una catena di sovrascorrimenti formatisi in larga parte durante quest'ultima fase. Il raccorciamento sud alpino è stimato sui 40-50km (Doglioni, 1992); la catena ha una geometria a ventaglio embriciato e struttura a triangolo frontale per un vasto settore (si veda fig.4).

L'assetto tettonico dell'area di studio appare quindi molto complesso; essa infatti si trova compresa tra due lineamenti strutturali sudvergenti degni della massima attenzione: la Linea della Valsugana a N e la Linea di Belluno a S.

Il territorio di Spresiano si colloca in prossimità al centro del fronte Prealpino delle Alpi Meridionali orientali che è stato coinvolto durante la fase di deformazione mesoalpina. Questa fascia presenta un elevato grado di sismicità, uno dei più alti nell'ambito delle Alpi, poiché il raccorciamento dei sovrascorrimenti frontali della catena assorbe gran parte del movimento di convergenza tra Europa e il margine settentrionale della Placca Adriatica, collegato verso sud all'Africa.

Nella Fig.7 sono indicate le faglie attive, nell'area di Spresiano, dal progetto Ithaca (Italy Hazard from Capable Faults) aggiornato al Settembre 2016.



Fig.7 Faglie attive nell'area di Spresiano dal progetto Ithaca (Italy Hazard from Capable Faults)

Il cinematismo delle faglie indicate è riportato nella tabella che segue (tab.2):

NOME DELLA FAGLIA	ULTIMA ATTIVITA'	POSSIBILITA' CHE LA FAGLIA SIRIATTIVI IN FUTURO	TIPO DI FAGLIA
Faglia di Nervesa	In corso di studio	/	trascorrente
Faglia di Sacile	Olocene (<10.000anni)	(media)	inversa
Faglia del Montello	Olocene (<10.000anni)	(media)	inversa

Tab.2

2.5 Faglie attive e faglie capaci

Negli anni '60 e '70 furono raccolti un gran numero di dati sull'attività Plio-Quaternaria delle faglie dell'Italia del NE, poi sintetizzati nella "Mappa Neotettonica dell'Italia" (CNR-PFG 1987). In questa vennero mappati i maggiori sistemi di thrust sud-vergenti che bordavano le pianure Veneta e Friulana ed influenzavano il dominio pre-Alpino, come strutture continue attive durante il Pliocene ed il Quaternario (faglie capaci).

La recente attività dei sovrascorrimenti che delimitano le pianure Veneta e Friulana viene rimarcata anche nella "Map of active faults between the Po and Piave River and Lake Como" (Castaldini & Panizza, 1991), che riporta 112 faglie attive nell'area compresa tra il lago di

Garda e la regione Friulana. Gli autori hanno mappato 4 principali strutture compressive dirette ENE-SW: le linee Bassano-Valdobbiadene, Aviano, Sacile e Valsugana Sud, insieme con un gran numero di faglie minori.

Un sommario a scala regionale delle faglie attive che interessano la catena orientale delle Alpi Meridionali è stato recentemente proposto da Galadini et al. (2001). Il lavoro, che rileggeva criticamente la letteratura disponibile, riportava nuovi dati di campagna del settore W dell'area indagata. La mappa elaborata includeva le faglie principali (come tracce superficiali) la cui lunghezza era consistente con terremoti di magnitudo $M=6,2$. Le faglie mappate sono caratterizzate dall'evidenza di attività o dall'indicazione di probabile attività durante il tardo Pleistocene-Olocene (dopo l'ultima massima espansione glaciale, LGM).

Il risultato di questa operazione fu un inventario di 8 faglie (si tratta di strutture continue maggiori) che interessavano l'area tra Thiene ed il bordo orientale Friulano. Una successiva rivisitazione critica del lavoro ridusse ulteriormente il numero di faglie attive.

La presenza di faglie attive in prossimità del territorio oggetto di studio può essere verificata consultando il catalogo delle faglie capaci ITHACA "Italy HAZard from CAPable faults" disponibile online (vedi fig. 8) consultabile dal sito internet della S.G.I. <http://sgi.isprambiente.it/GMV2/index.html>.

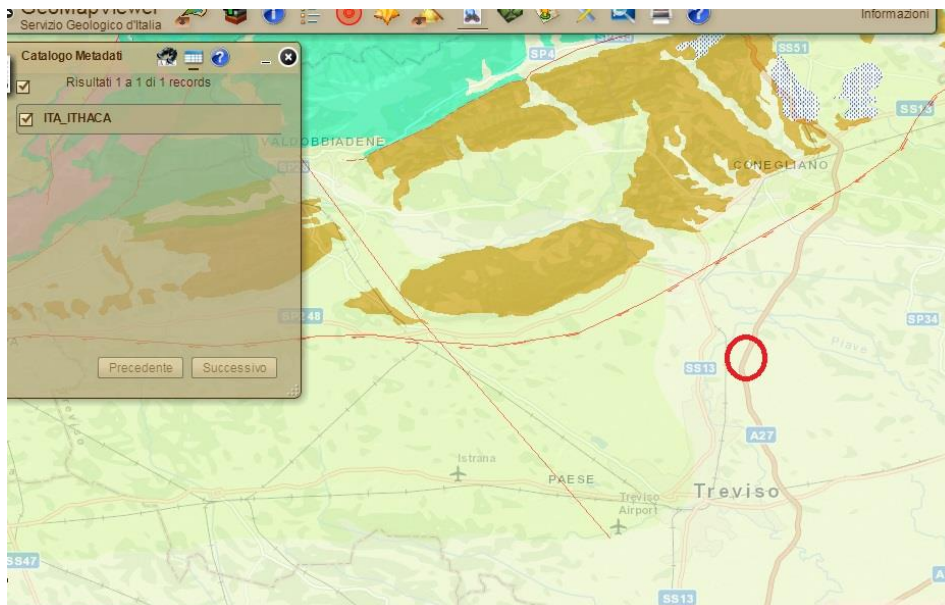


Fig. 8 Faglia Montebelluna–Montereale con riportata la posizione dell'area in oggetto. Fonte ITHACA

3. INDAGINI GEOGNOSTICHE

Le indagini condotte all'interno dell'area in esame, sono: n. 1 indagine sismica Re.Mi. + MASW combinate, una HVSR, due prove penetrometriche dinamiche continue (DP) e una linea tomografica elettrica (ERT).

3.1 Prove penetrometriche DP

Le prove penetrometriche dinamiche, spinte fino a rifiuto, avevano lo scopo di verificare gli spessori dei materiali riportati nel lotto in esame. Come accennato sono state effettuate due penetrometrie dinamiche (DP) utilizzando un penetrometro dinamico medio (secondo classificazione ISSMFE 1988) mod. PDM 30 della Pagani.

La lunghezza delle aste del penetrometro è di 1 m e ogni 10 cm di avanzamento sono stati contati il n. di colpi necessari per l'avanzamento stesso a seguito delle battute date da una massa di 30 kg la cui volata è di 20 cm. Il n. di colpi è poi legato alla resistenza dinamica dei litotipi secondo la nota formula "degli olandesi":

$$R_d = M^2 \cdot x_h / (A \cdot x_e (M + P))$$

Dove:

M= massa battente

H= altezza di caduta

A= area punta

P= peso supporto e aste

e=avanzamento medio per colpo

Nelle tabelle e nei diagrammi in allegato I sono riportati:

- Le letture di campagna con il n. di colpi, che è legato alla resistenza dinamica (R_d) offerta dal terreno all'avanzamento della punta conica (e che esprime, quindi, i valori dei carichi di rottura dei materiali attraversati) e i valori corrispondenti di colpi delle prove SPT;
- I relativi diagrammi di resistenza (in kg/cmq);
- I parametri geotecnici derivati.

Di seguito si sintetizza la situazione litostratigrafica riscontrata. Le due prove concordano molto bene, mostrando che il sito è caratterizzato da una stratificazione omogenea dal punto di vista dei tipi litologici presenti. Di seguito si riportano le stratigrafie di sintesi.

Agli strati individuati, date le caratteristiche di rigidità dinamica misurate, si possono affidare i seguenti parametri geotecnici di progetto:

Strato 1 (da p.c. a -1,0 m)

- angolo di attrito $\phi'k = 26^\circ$;
- peso di volume $\gamma'k = 17 \text{ kN/mc}$;

Strato 2 (da -1,2)

- angolo di attrito $\phi'k = >40^\circ$;
- peso di volume $\gamma'k = 18 \text{ kN/mc}$;

Strato 1 (da p.c. a -1,2 m)

- angolo di attrito $\phi'k = 26^\circ$;
- peso di volume $\gamma'k = 17 \text{ kN/mc}$;

. Per i dettagli si rimanda all'allegato n. 1 (Elaborati prove penetrometriche).

3.2 Indagini sismiche

Ad integrazione delle informazioni riguardanti la stratigrafia del sottosuolo ottenute dalle DP condotte e da indagini precedentemente svolte nella stessa lottizzazione, è stata condotta una campagna di misure del rumore sismico ambientale e di sismica di superficie. In particolare sono state eseguite 1 registrazione del rumore sismico ambientale (HVSR), allo scopo di stimare il valore della frequenza di risonanza del sito e 1 misura di sismica superficiale con la metodologia Masw e Re.Mi combinate, al fine di determinare il valore delle Vs. L'ubicazione è riportata nella carta delle indagini (fig. 18).

3.3 Cenni sulle misure passive del rumore sismico ambientale (HVSR)

Questa metodologia di indagine consente di valutare in modo speditivo la presenza di effetti di amplificazione sismica locale permettendo, in caso di contrasti di impedenza significativi e in siti non caratterizzati dalla presenza di forme sepolte particolarmente complesse (valli, bacini, ecc..) di definire il valore della frequenza fondamentale (f_0) del sito stesso. Essa rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nel realizzare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, al fine di evitare effetti di "doppia risonanza", estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremiti. La forma di un'onda registrata in un sito da uno strumento dipende:

- 1.dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s,
- 2.dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda),
- 3.dalla risposta dello strumento.

Possiamo esprimere questo concetto come:

segnale registrazione al sito x = sorgente * effetti di percorso * funzione trasferimento strumento

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento con frequenze generalmente inferiori a 0.5Hz) e dall'attività antropica (attività industriali, traffico con frequenze generalmente superiori a 0.5 Hz) oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Viene anche definito Microtremore, in quanto le oscillazioni registrate presentano un'ampiezza minore rispetto a quelle provocate da sismi, specialmente in prossimità dell'epicentro. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che, se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali dei sottosuoli; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Il metodo H/V (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) fu introdotto inizialmente da Nogoshi e Igarashi (1970), ma fu Nakamura (1989) a rendere tale tecnica popolare a tal punto da denominare la stessa prova "di Nakamura".

Esso consiste nella valutazione, su base sperimentale, dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie del terreno, misurati in un punto (sito di prova) con un apposito sismometro a tre componenti. La tecnica HVSR richiede l'utilizzo di un velocimetro triassiale in grado di registrare i microtremori (rumore sismico ambientale) lungo le due direzioni orizzontali (N-S,E-O) e lungo quella verticale (Z),in un ampio intervallo di frequenze (0.5-100Hz) e per una durata sufficientemente lunga (nel caso specifico, 11 minuti).Le misure registrate vengono poi convertite, elaborate e restituite graficamente in forma di spettri H/V in funzione della frequenza (vedi allegati) dove H rappresenta la media delle due componenti orizzontali, con orientamento N-S ed E-O mentre V indica la componente verticale del moto. Dal grafico spettrale medio, si osserva la presenza di picchi: questi sono dovuti a contrasti di impedenza, che evidenziano fenomeni di risonanza sismica e consentono, allo stesso tempo, di stimare la frequenza di amplificazione del terreno. Per esempio, nel caso in cui la misura venga effettuata su basamento sismico affiorante (e quindi dove non sono attesi fenomeni di risonanza sismica) la curva non mostra massimi significativi; al contrario, se la prova viene effettuata su una coltre di sedimenti soffici, sopra un basamento rigido, non solo è possibile osservare dei picchi e quindi stimare la frequenza di amplificazione, ma anche, in presenza di taratura (nel nostro caso ottenuta con le misure Masw eseguite), è possibile stabilire una relazione fra spessore H dello strato soffice, la velocità media delle onde S (stimata nel nostro caso con le misure Masw) all'interno di quest'ultimo (V_s) e la frequenza di risonanza fondamentale f_0 dello strato, nella forma:

$$f_0 = V_s / 4H$$

Riguardo alle indagini HVSR, è stato redatto un documento, nell'ambito del progetto SESAME, che definisce delle linee guida per l'esecuzione di tali prove: più precisamente, tale documento, riporta una serie di criteri che la curva risultante dall'indagine e l'area circostante la frequenza di picco, dovrebbero soddisfare. E' importante sottolineare che se i criteri sono soddisfatti, ciò non implica necessariamente che l'indagine sia stata effettuata correttamente; viceversa, quando i criteri non sono soddisfatti non significa che l'indagine sia da scartare a priori.

La condizione fondamentale, prima di procedere all'estrazione di qualsiasi informazione e interpretazione, riguarda la verifica di "congruità" della curva H/V; in pratica bisogna verificare l'attendibilità della curva ottenuta secondo i seguenti criteri:

1) f_0 (freq. di picco) $> 10 / l_w$ (lunghezza finestra temporale); questa condizione è proposta in maniera tale che, alla frequenza di interesse, in ogni finestra ci siano almeno 10 cicli significativi (tab.1). Se i dati lo permettono è possibile verificare se la condizione f_0

(freq. Di picco) $> 20/l_w$, il che' renderebbe il picco eventuale ancora più significativo, ma questo non è d'obbligo.

2) C'è bisogno di un grande numero di cicli e di finestre: quando si usa la selezione automatica delle finestre temporali con i parametri di default, il n. totale di cicli significativi: $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ deve essere > 200 (che significa che ad esempio per un picco di 1Hz , ci siano almeno 20 finestre da 10 secondi ciascuna, o per un picco da 0.5 Hz ci siano 10 finestre da 40s);

3) E' necessario che ci sia un valore di scattering basso tra tutte le finestre: deviazioni standard elevate spesso sono dovute a rumore ambientale non stazionario che può perturbare il segnale e tradursi in un risultato non significativo relativamente alla determinazione del picco di frequenza H/V. Comunque si raccomanda che $\sigma_A(f)$ sia minore di un fattore 2 (per $f_0 > 0.5$ Hz), o un fattore 3 (per $f_0 < 0.5$ Hz), in un range di frequenze di almeno $[0.5f_0, 2f_0]$.

Tab.3 Durata delle registrazioni raccomandata.

f_0 [Hz]	Minimum value for l_w [s]	Minimum number of significant cycles (n_c)	Minimum number of windows	Minimum useful signal duration [s]	Recommended minimum record duration [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Nel nostro caso specifico è sempre stata utilizzata una durata di 11' (600 s) e un valore delle finestre temporali di 20 s.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un sismografo della ABEM Instrument AB mod.Terraloc Pro a 48 canali e 24 bits, con una terna di geofoni a bassa frequenza (uno verticale e due orizzontali).

L'accorgimento adottato è stato quello di verificare che i sensori fossero posizionati in bolla e che la componente longitudinale fosse rivolta verso Nord.

La relazione che si applica per il calcolo della profondità delle superfici con i maggiori contrasti di impedenza è la seguente:

$$T_s = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

dove:

- T_s =periodo della vibrazione (s)
- ω = frequenza misurata (rad)
- H =profondità del sismostrato (m)
- V_s =velocità delle onde di taglio (m/s)

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si è potuto ricavare il valore di frequenza caratteristica del sito.

3.4 Cenni sulle misure di sismica superficiale con le metodologie Masw e Re.Mi combinate

Le misure Masw (sismica attiva) e Re.Mi. (sismica passiva) sono molto utili per ricavare il profilo della velocità delle onde S (V_s) nel sottosuolo.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il metodo sfrutta le onde di superficie e il fenomeno della dispersione delle stesse (variazione della velocità di fase con il variare della frequenza).

Solitamente si tratta di onde di Rayleigh in caso di acquisizioni terrestri. In particolare, poiché le onde di Rayleigh si propagano lungo la superficie topografica in uno strato di profondità circa pari alla lunghezza d'onda, in mezzi stratificati verticalmente eterogenei, le diverse lunghezze d'onda, relative alla propagazione di armoniche a diversa frequenza, si propagano con velocità di fase che dipende dalle proprietà dei materiali interessati dalla propagazione. Ciò fa sì che la velocità di fase sia funzione della frequenza dell'onda stessa. Tale dipendenza prende il nome di dispersione geometrica e viene rappresentata tramite la curva di dispersione (velocità di fase vs. frequenza). La propagazione delle onde di superficie è un fenomeno multimodale, una stessa frequenza può propagarsi contemporaneamente a diverse velocità, e ogni velocità viene chiamata modo.

Dalla curva di dispersione sperimentale è possibile caratterizzare il sottosuolo in termini di variazione della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s), e quindi del modulo di rigidità al taglio dinamico (G_0), in funzione della profondità.

L'utilizzo delle prove per onde superficiali ha molti campi di applicazione, dalla stima della V_{S30} richiesta dalle NTC18, alla valutazione dei parametri utili a studi approfonditi di pericolosità sismica; dalla caratterizzazione di discariche, alla valutazione della profondità e dello stato di alterazione di substrati superficiali in presenza di falde acquifere, nonché la caratterizzazione di versanti e depositi.

Generalmente il metodo assume come modello del terreno un mezzo elastico-lineare a strati omogenei. Nella maggior parte delle applicazioni, la tecnica è quindi utilizzata per stimare un profilo verticale 1D di V_S , ma vi sono molte applicazioni in siti con moderate variabilità laterali in cui il metodo consente di stimare distribuzioni di V_S pseudo-2D/3D.

Le indagini sono state condotte utilizzando un sismografo a 48 canali mod. ABEM Terraloc Pro a 24 bits.

Sono stati realizzati stendimenti con array lineare e un offset intergeofonico di 2 m e 5 m come distanza di battuta.

Sono state effettuate 10 registrazioni da 30 secondi ciascuna per il metodo passivo e una registrazione da 2 secondi, per il metodo attivo. I geofoni usati sono di tipo verticale da 4.5 Hz e grazie alla dinamica dello strumento (24bits, range dinamico 117 DB), consentono la registrazione delle onde di superficie con contenuto in frequenza fino a circa 2 Hz.

I dati acquisiti in campagna sono stati quindi elaborati ed è stato possibile ricostruire un modello V_S /profondità attendibile.

Qualora necessario, in fase di elaborazione, è possibile effettuare il picking della curva Velocità/frequenza per il solo modo fondamentale di vibrazione, oppure per diversi modi di vibrazione (fino al decimo). Nella fattispecie si è ricorsi al picking del primo modo di vibrazione.

Le misure MASW effettuate sono state molto utili per tarare le misure H/V viste nel paragrafo precedente, poiché hanno consentito di partire da un profilo di V_S noto e quindi hanno consentito un doppio controllo della potenza degli strati incontrati.

3.5 Cenni sulle misure tomografiche elettriche (ERT)

La resistività elettrica rappresenta una delle proprietà fisiche più utilizzate per l'esplorazione geofisica del sottosuolo, grazie soprattutto all'ampio spettro di valori che essa può assumere al variare della natura dei corpi investigati.

Questa metodologia rappresenta uno dei sistemi d'indagine più conosciuti e affidabili, le cui principali applicazioni consentono di ricostruire la stratigrafia di massima dei terreni, rilevare la presenza di strutture sepolte, effettuare ricerche idriche o di acquiferi a diverso grado salino, monitorare movimenti degli acquiferi stessi o di fluidi in generale, mappare siti contaminati.

Tale sistema d'indagine consente di ottenere la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo, elettricamente disomogeneo, immettendo una corrente continua mediante due elettrodi conficcati nel terreno, detti convenzionalmente AB, e misurando contemporaneamente la differenza di potenziale (d.d.p.) associata al campo elettrico generato tra due elettrodi distinti dai primi, detti convenzionalmente MN (fig.9).

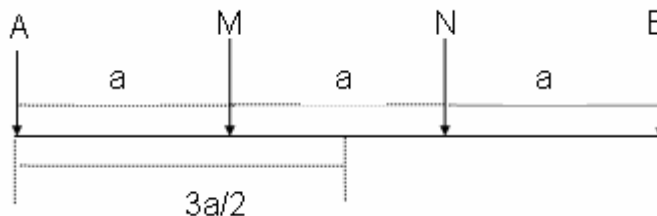


Figura 9 - Schematizzazione del dispositivo quadripolare tipo WENNER, comunemente utilizzato per l'acquisizione di dati di resistività elettrica. AB: elettrodi di corrente; MN: elettrodi di potenziale.

Variando la distanza tra gli elettrodi A e B, o tra M e N, o tra AB e MN, e misurando ogni volta la corrente immessa agli AB e la differenza di potenziale "d.d.p." risultante agli MN, si ottiene la resistività detta apparente, secondo la formula:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad \text{dove } k = \pi \frac{AM * AN}{MN} \quad (\Omega m)$$

in cui k è la costante geometrica del dispositivo quadripolare e dipende soltanto dalle distanze interelettrodiche.

Il valore di resistività apparente varia in funzione: a) della posizione reciproca degli elettrodi A, B, M e N (quadripolo elettrico), in quanto parti diverse del corpo vengono investigate dal passaggio della corrente; b) dalla misura della risposta in termini di d.d.p..

A causa della loro maggiore convenienza in termini di tempi di esecuzione delle misure, la pratica geofisica ha privilegiato alcune combinazioni dei 4 elettrodi A, B, M e N, come ad esempio quella di fig. 9, detta quadripolo "**Wenner**", dove gli elettrodi sono equidistanziati e sullo stesso asse.

A passo costante (distanza interelettrodo) corrisponde una profondità di investigazione all'interno del terreno all'incirca costante, mentre per ottenere un'informazione a diverse profondità occorre allargare progressivamente il passo del quadripolo.

Nel presente lavoro è stato utilizzato un altro tipo di dispositivo che ha rivelato una maggior efficacia nelle indagini in terreni come quello in oggetto. Questa geometria quadripolare corrisponde al cosiddetto “**gradiente multiplo**” (Multiple Gradient Array), che presuppone la disponibilità di uno strumento multicanale in grado di effettuare sino a 8 misure di resistività contemporaneamente. In questo caso si mantiene fissa la posizione degli elettrodi di corrente, traslando quelli di potenziale e misurando di volta in volta la d.d.p.

La schematizzazione del dispositivo tipo “Gradient Array” è riportata in fig.10, con C_1 C_2 elettrodi di corrente e p_1 p_2 elettrodi di potenziale.

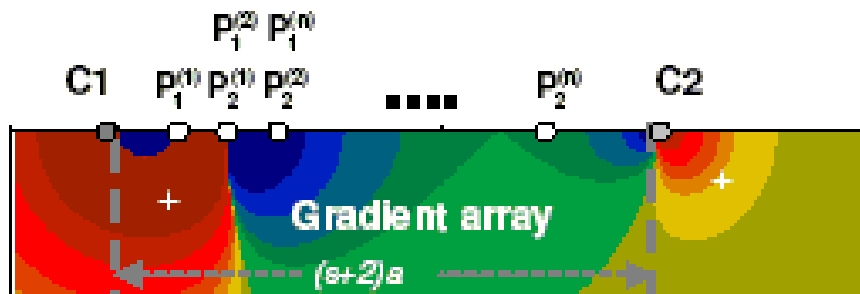


Figura 10 - Schematizzazione del dispositivo quadripolare tipo “Gradient array”, utilizzato per l’acquisizione dei dati di resistività elettrica

La maggior efficacia di queste misure sta nel fatto che esse risultano avere una grande capacità risolutiva sia in senso verticale che laterale. Essendo però composte da un numero di punti di misura molto elevato rispetto ai dispositivi elettrodoici “tradizionali”, non sono molto praticate, in quanto richiedono una strumentazione particolarmente sofisticata.

La **tomografia elettrica** rappresenta la tecnica di indagine geoelettrica che permette di acquisire informazioni in simultanea dipendenza della profondità e della distanza orizzontale interelettrodo, e che quindi consente di ottenere informazioni reali sui valori di resistività sia in senso verticale che laterale (lungo cioè una sezione bidimensionale).

Questa metodologia di misura, che nella pratica geofisica costituisce l'evoluzione attuale della nota prospezione geoelettrica, è stata messa a punto alcuni anni fa sfruttando i progressi dell'elettronica, sia per un'acquisizione automatica sul campo che per un'interpretazione dei dati in termini bi- e tri-dimensionali.

Tale tecnica permette di disporre sul terreno da investigare un numero elevato di elettrodi (32, 64 o più), con distanza reciproca dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste; attraverso gli elettrodi viene alternativamente inviata corrente o misurata la differenza di potenziale, in una sequenza pre-programmata. Si ottiene così l'andamento sia verticale che laterale della resistività apparente, che è uso rappresentare in forma di pseudosezione, ossia come tabella di valori organizzati in un piano di riferimento dove sull'asse orizzontale si riporta un valore corrispondente alla distanza sul terreno tra gli elettrodi più esterni, e sull'asse verticale un'ordinata ricavata dalla complessiva larghezza del quadripolo.

Il risultato è quindi una figura bidimensionale nella quale tutti i punti di eguale resistività apparente vengono collegati da una curva detta iso-resistiva. Questo quadro deve essere quindi opportunamente "interpretato" in modo da poter desumere dalle resistività apparenti i valori della resistività reale e la geometria della sua distribuzione.

Nelle indagini è stato utilizzato un georesistivimetro mod. ABEM Terrameter LS2 con compensazione automatica dei potenziali spontanei.

Il trasmettitore di corrente opera con correnti da 0.2 a 2500 mA, con un voltaggio massimo di ± 600 V ed un impulso t di corrente variabile da 0.1 a 4 sec. Il ricevitore, a quattro canali, ha un'impedenza min. di 10 M Ω . La precisione di $\Delta V/I$ risulta superiore allo 0.5%.

I dati sono stati elaborati e interpretati in termini di profili di resistività mediante il software ErtLab 2D-3D[®].

Come già anticipato è stato realizzato uno stendimento lineare, con interdistanza tra gli elettrodi di 3 m.

L'ubicazione delle indagini è riportata nella carta delle indagini. L' ERT realizzato consente di escludere la presenza della FAC nel terreno interessato all'ampliamento.

Si vede infatti molto bene il passaggio dai terreni resistivi superficiali a terreni più conduttivi (probabile presenza di acqua), senza peraltro rilevare l'evidenza di un contatto laterale.

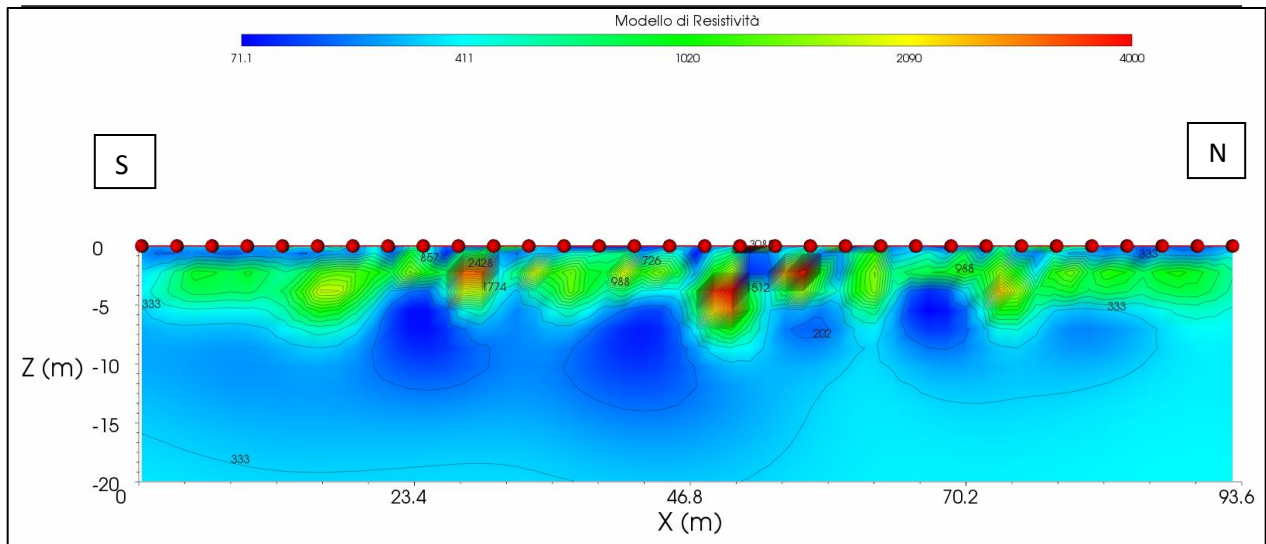


Figura 11 – Sezione elettrostratigrafica ottenuta: in sequenza si vedono terreni conduttivi superficiali (riporti eterogenei), seguiti terreni resistivi (ghiaie), che poi passano a valori di resistività inferiori per la probabile presenza di acqua

3.4.1 Analisi delle risultanze

Per quanto riguarda la registrazione H/V, analizzando l'andamento dei rapporti spettrali e sapendo che l'ampiezza del picco è direttamente proporzionale al contrasto d'impedenza tra i sismostrati, è possibile attribuire al picco localizzato a 12.0 Hz il principale contrasto sismico presente nel sottosuolo. Si tratta di un passaggio litologico superficiale, attribuibile al passaggio riporto/ghiaia.

Di seguito si riporta la curva ottenuta (fig.12):

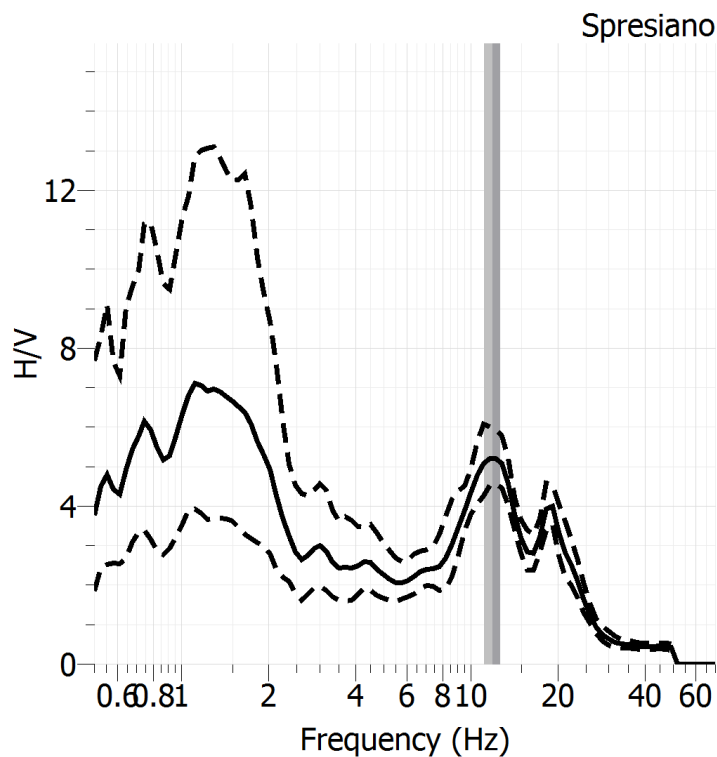


Fig.12: picco H/V

$L_w = 20$ s

Record duration = 11'

$f_0 = 12.0 \text{ Hz}$

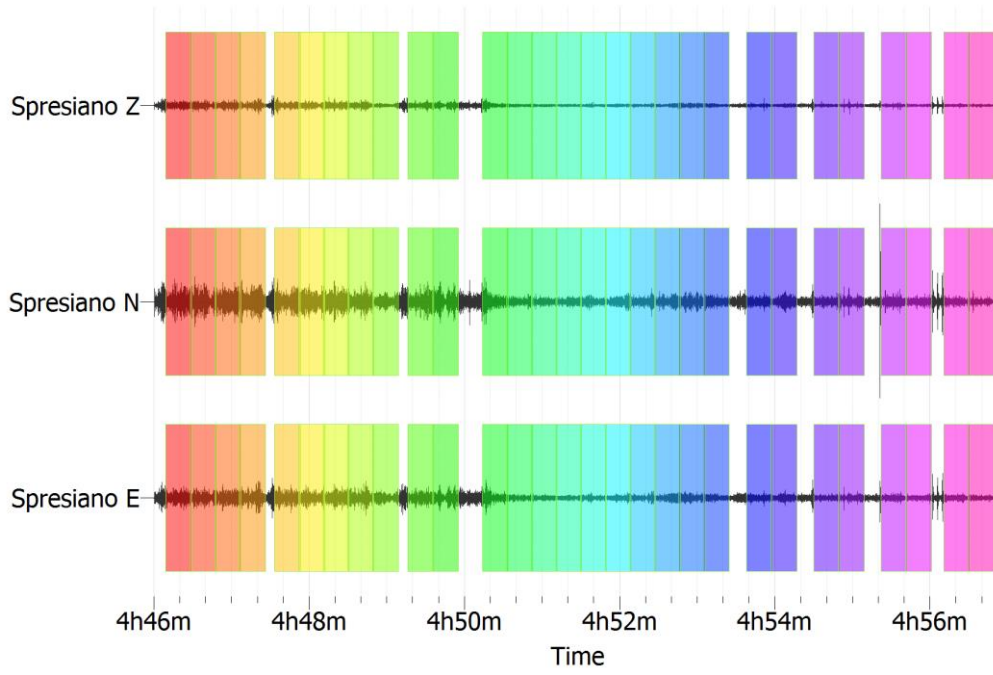


Fig.13 Time History

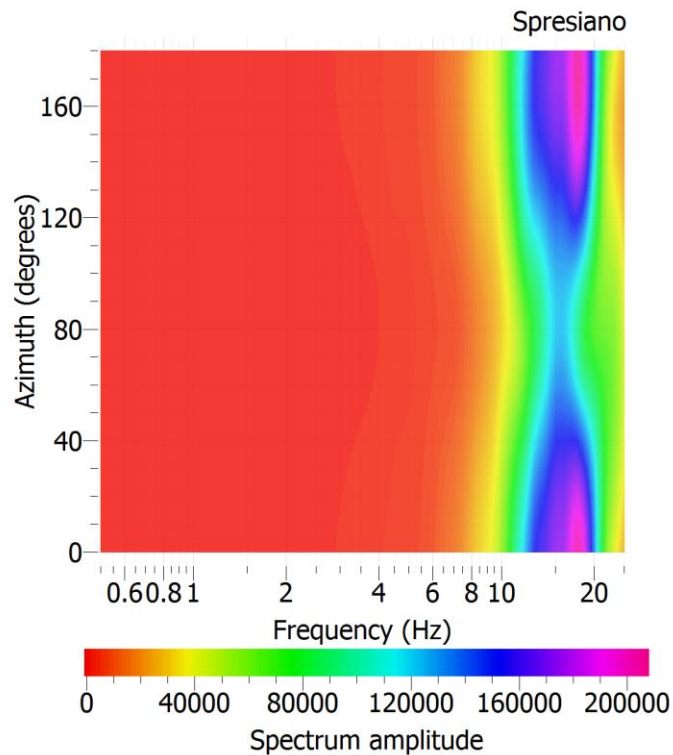


Fig. 14 Direzionalità

Come si può notare in fig. 14 il picco a 12.0 Hz presenta anche una discreta omnidirezionalità.

MASW

L'indagine eseguita ha permesso la determinazione dell'andamento della velocità delle Vs fino a circa 40 m di profondità.

Di seguito si riportano le immagini relative alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh e del modello che ne deriva previa inversione dei dati. L'errore quadratico medio calcolato è del 2.6 %.

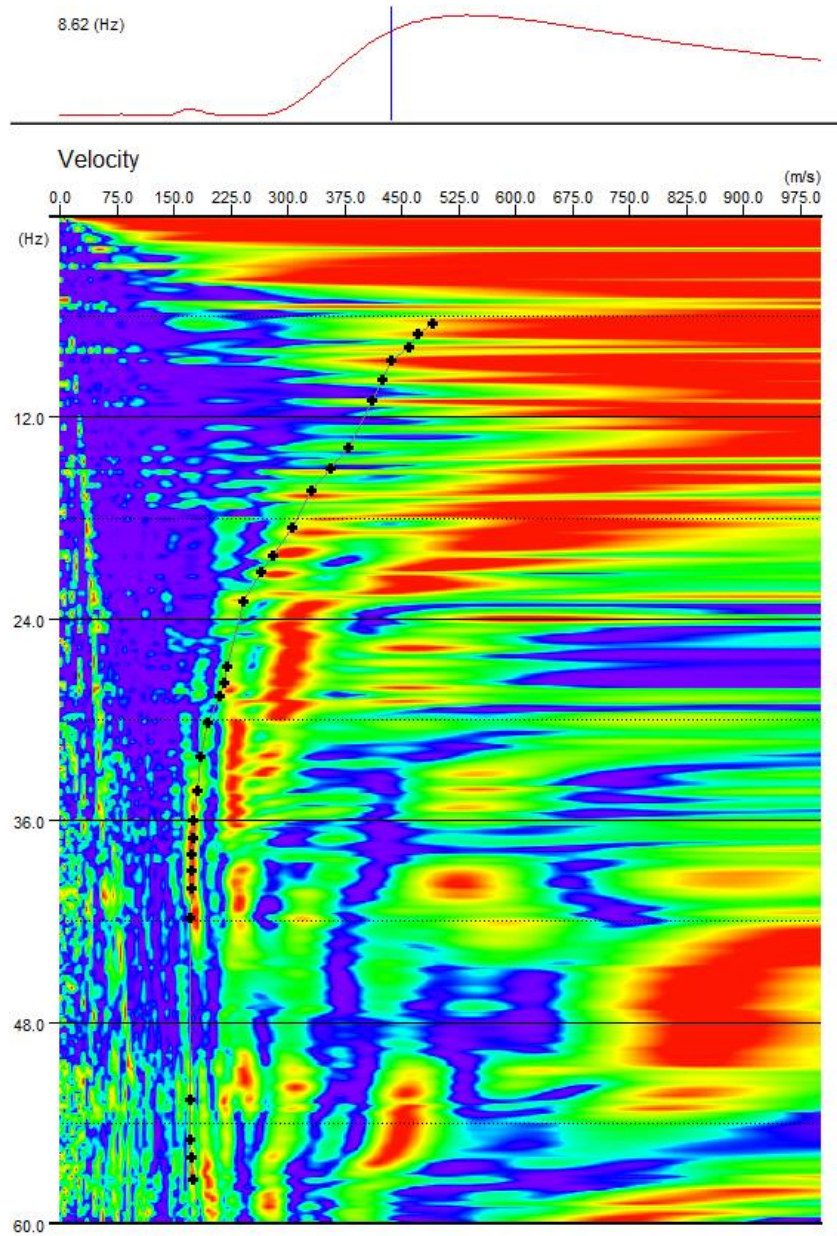


Fig. 15 CURVA DI DISPERSIONE CUMULATIVA METODI ATTIVO E PASSIVO

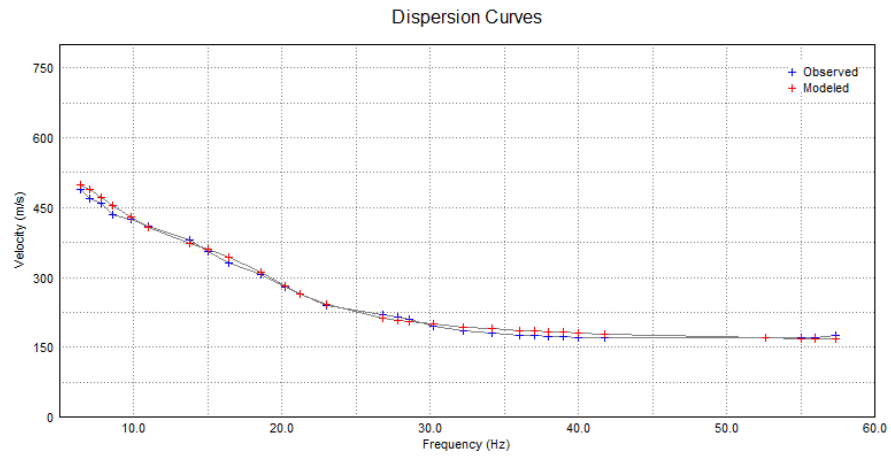


Fig.16 CURVA DI DISPERSIONE MISURATA (BLU) E CALCOLATA (ROSSO)

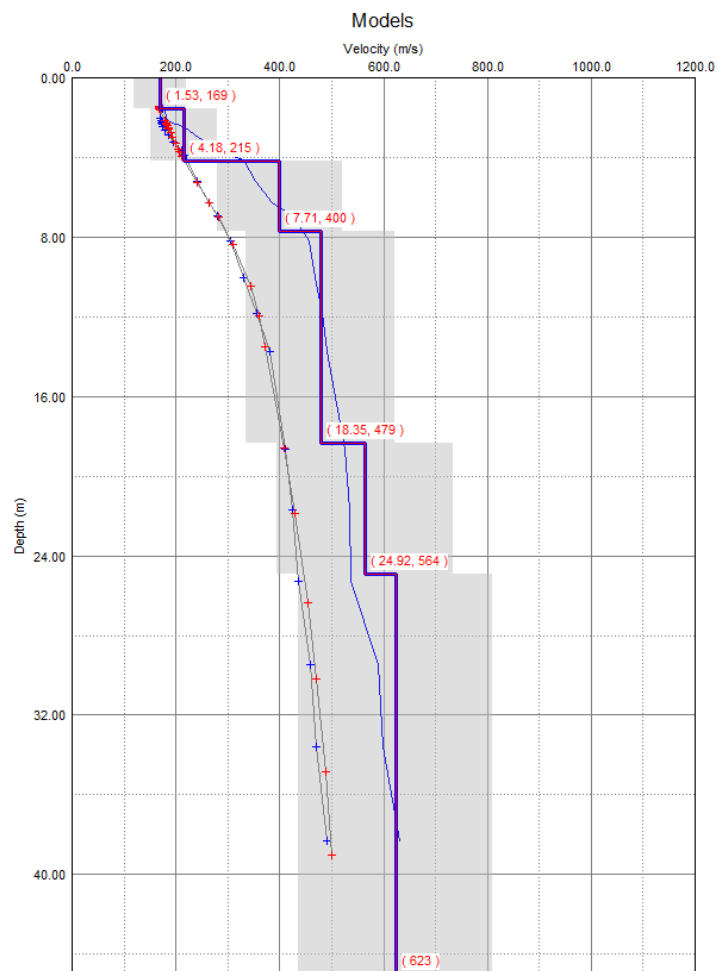


Fig. 17 MODELLO RISULTANTE DALL'INVERSIONE DEI DATI

La V_{s30} è stata ricavata dalla formula:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{v_i}}$$

Nel caso specifico è risultato:

$$V_{s30} = 415 \text{ m/s}$$

Si tratta quindi di un suolo tipo **B**.

4. MICROZONAZIONE SISMICA

4.1 Introduzione

Per la stesura della Microzonazione di terzo livello, si è fatto riferimento agli “Standard di rappresentazione e archiviazione informatica – Microzonazione sismica ”vers.4.0” della Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica e alle “Linee guida per l’esecuzione di studi di microzonazione sismica”, allegato “A” della DGRV n. 1572 del 03.09.2013. Quest’ultima prevede il terzo livello per le “aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico”.

Gli elaborati cartografici realizzati, secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0, per la Microzonazione di terzo livello, sono i seguenti: - Carta delle Indagini scala 1:2.000; - Carta della Pericolosità Sismica Locale alla scala 1:2.000; - Carta delle Frequenze Fondamentali di Vibrazione scala 1:2.000.

Nella “**Carta delle Indagini**” alla scala 1:2.000 sono state ubicate le indagini descritte nel capitolo 3. Questa zona è caratterizzata dalla presenza del litotipo “*ghiaia in matrice sabbiosa, debolmente limosa, e ghiaie a volte cementate in profondità di origine fluviale e/o fluvioglaciale*”. Sono state inserite n.1 prove HVSR, n.2 MASW, n.2 REMI.

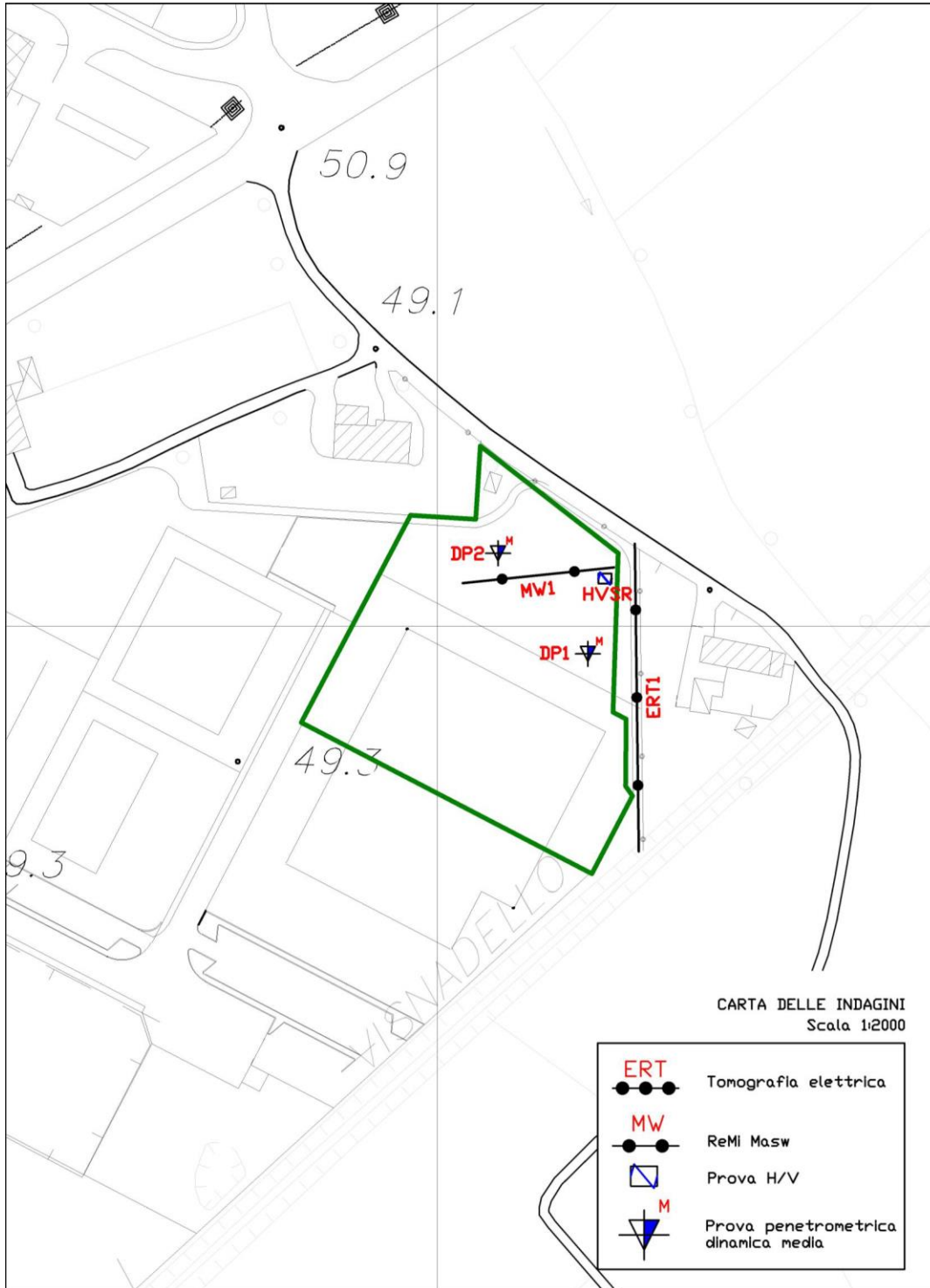


Figura 18 – Carta delle indagini

Nella "Carta della pericolosità sismica locale" alla scala 1:2.000, quest'area rientra nelle seguenti zone:

- **P4a** – Zona suscettibile ad amplificazioni litologiche : *"ghiaia in matrice sabbiosa, debolmente limosa, e ghiaie a volte cementate in profondità di origine fluviale e/o fluvioglaciale"*.

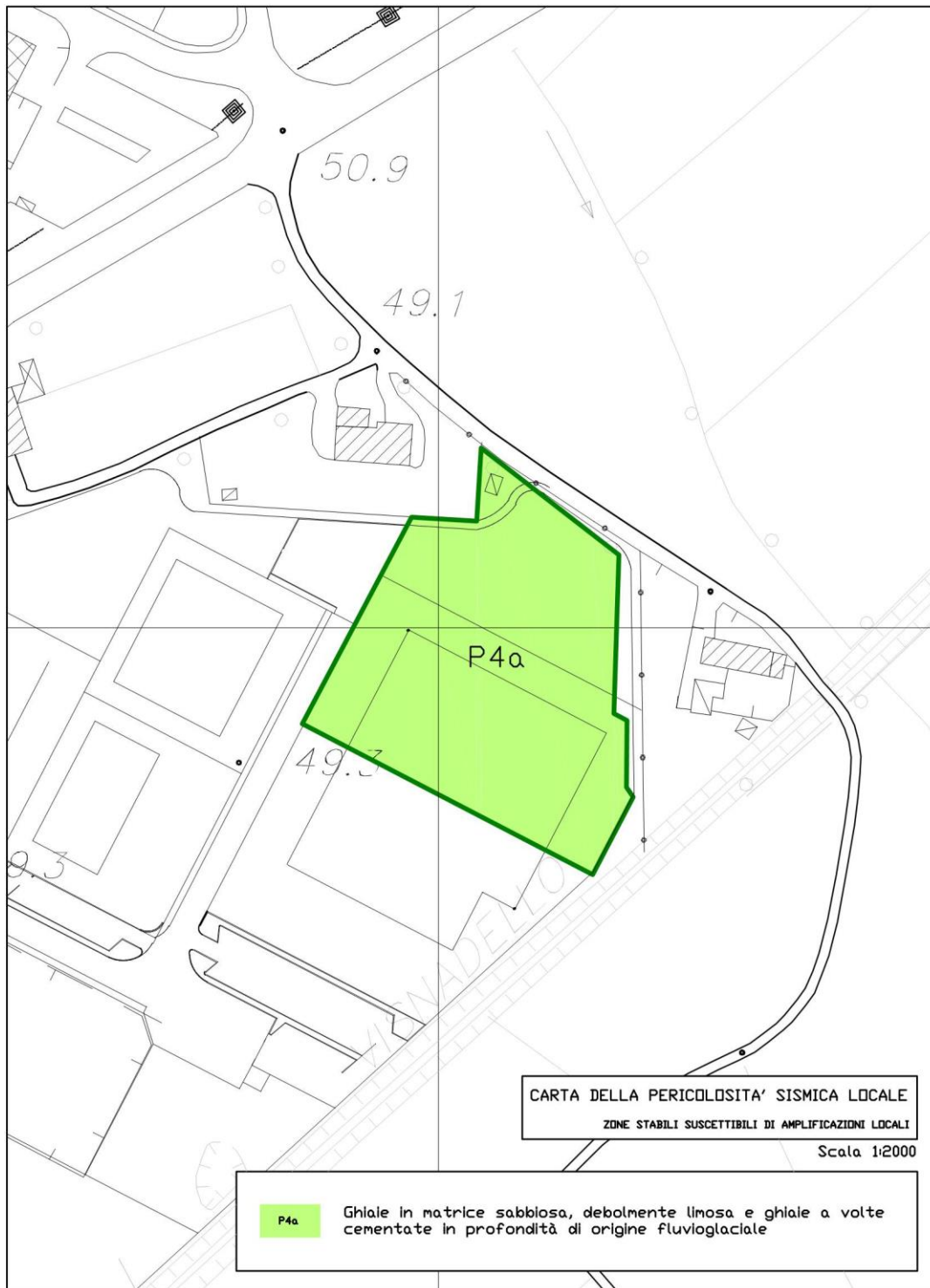


Figura 19 – Carta della pericolosità sismica locale

I risultati delle misure HVSR sono stati rappresentati nella “**Carta delle frequenze fondamentali di vibrazione**” alla scala 1:2.000 (fig.21).

Sono state riscontrate frequenze di risonanza ben riconoscibili come picchi nei grafici H/V. In particolare il punto di misura è stato rappresentato con le seguenti modalità:

-simbolo unificato per prova HVSR *avente frequenza fondamentale (f_0) pari a 12 Hz con ampiezza di picco superiore a 5.*

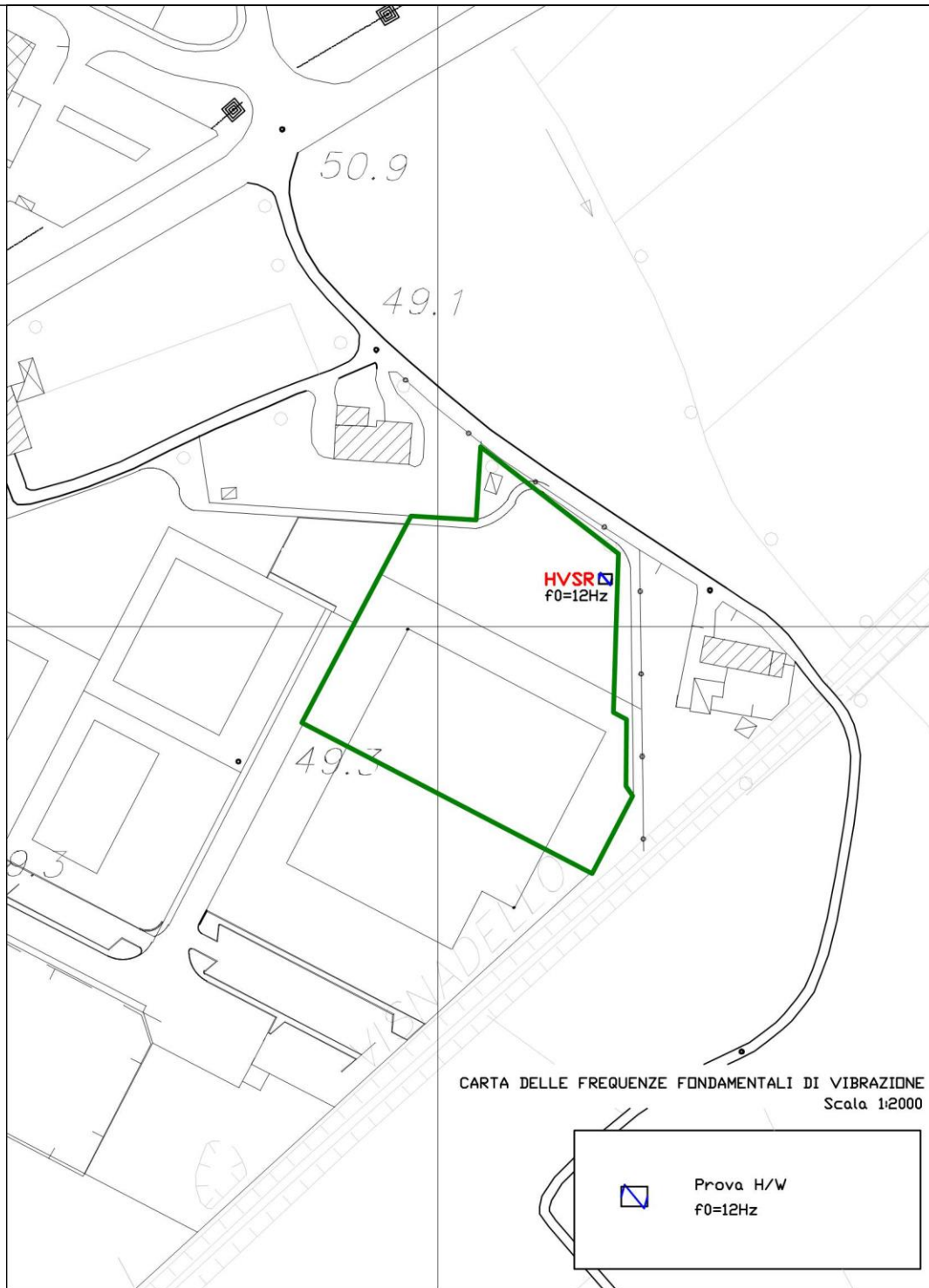


Figura 21 – Carta delle frequenze fondamentali di vibrazione

5. MODELLAZIONE NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE DI TERZO LIVELLO

5.1 Premessa

La DGRV n.1572/2013 stabilisce che il terzo livello deve essere applicato a diverse categorie determinate nella Carta della Pericolosità sismica:

Il terzo livello di microzonazione sismica è stato concepito per quantificare correttamente la risposta sismica locale di sito, in quanto la procedura di secondo livello, con gli abachi, a volte non risulta corretta perché creata con modelli che non riescono a riprodurre il comportamento dinamico di tutti i terreni.

Il sito in esame, come abbiamo visto, si trova in una zona potenzialmente instabile (P4a), per cui ricade nella casistica dei siti da approfondire al terzo livello in sede di PI.

La valutazione della risposta sismica locale mediante analisi 1D permette di definire una realistica risposta sismica stratigrafica di terreni non affetti da problematiche bidimensionali (sia sepolte sia topografiche). Questo approccio è ritenuto la via ufficiale delle **NTC2018 (Cap. 3.2.2)** e consente, in determinati casi e mediante il confronto con la relativa categoria di sottosuolo (**Cap. 3.2.2 NTC2008**), elementi di risparmio rispetto all'approccio semplificato di normativa (categorie di sottosuolo), poiché identifica amplificazione per intervalli di periodi solitamente più limitati rispetto a quelli di normativa; trattandosi peraltro di un edificio produttivo, diventa d'obbligo lo studio della risposta sismica locale in luogo degli approcci semplificati. Si è proceduto ad un approfondimento di indagine che è consistito essenzialmente nell'esecuzione di due nuove prove penetrometriche dinamiche DPM, ad integrare i dati preesistenti, spinte fino a rifiuto.

Per la determinazione delle caratteristiche dinamiche dei terreni, è stato eseguito uno stendimento sismico condotto secondo la metodologia MASW attiva e passiva.

I contenuti della relazione sulla modellazione sismica sono:

- 1) Determinazione dell'accelerazione massima di riferimento;
- 2) Definizione scelta progettuale (V_n , C_u , Stati Limite);
- 3) Stima dei parametri di disaggregazione (es. M-R);

4) Modalità di estrazione degli input sismici e loro rappresentazione.

Indicazione del codice utilizzato e del fattore di scala medio finale;

5) Indicazione della sismostratigrafia utilizzata nell'analisi (Vs, spessori, densità e tipologia materiali);

6) Indicazione del tipo di software e certificazione del grado di qualità in output dell'analisi.

5.2 Modellazione sismica

5.2.1 Determinazione dell'accelerazione massima di riferimento

L'accelerazione massima di riferimento è quella dettata dalle NTC 2018 e già utilizzata negli approcci semplificati di cui si è accennato in premessa.

Date le coordinate del sito (WGS84: Lat. 45,7687, Long. 12,2609) si è proceduto, tramite l'apposito foglio di calcolo "Spettri NTC 2008" del ministero LL.PP. a individuare le PGA da utilizzare nel sito in esame che, vista la tipologia di opera (si veda paragrafo successivo) sono pari a 0.184 g (SLV) e a 0.049 g (SLO).

5.2.2 Determinazione Scelta progettuale

Trattandosi di un edificio ad uso uffici, la classe delle costruzioni è la II. Ne consegue un coeff. d'uso $C_u = 1.5$, con vita nominale $V_n = 50$ anni e un tempo di ritorno T_r di 475 anni per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e di 30 anni per lo stato limite di operatività (SLO) con probabilità di eccedenza del 81%.

5.2.3 Analisi di disaggregazione

La disaggregazione della pericolosità sismica è una operazione che consente di determinare il contributo di varie sorgenti sismogenetiche alla pericolosità sismica del sito in esame. Per questo tale analisi viene condotta in termini di magnitudo (M) e distanza (R). In particolare, per il progetto oggetto del presente studio, si sono cautelativamente tenuti in considerazione terremoti di magnitudo compresi tra 4.0 e 7.0 e di una distanza compresa in un raggio di 30 km

dal sito in esame.

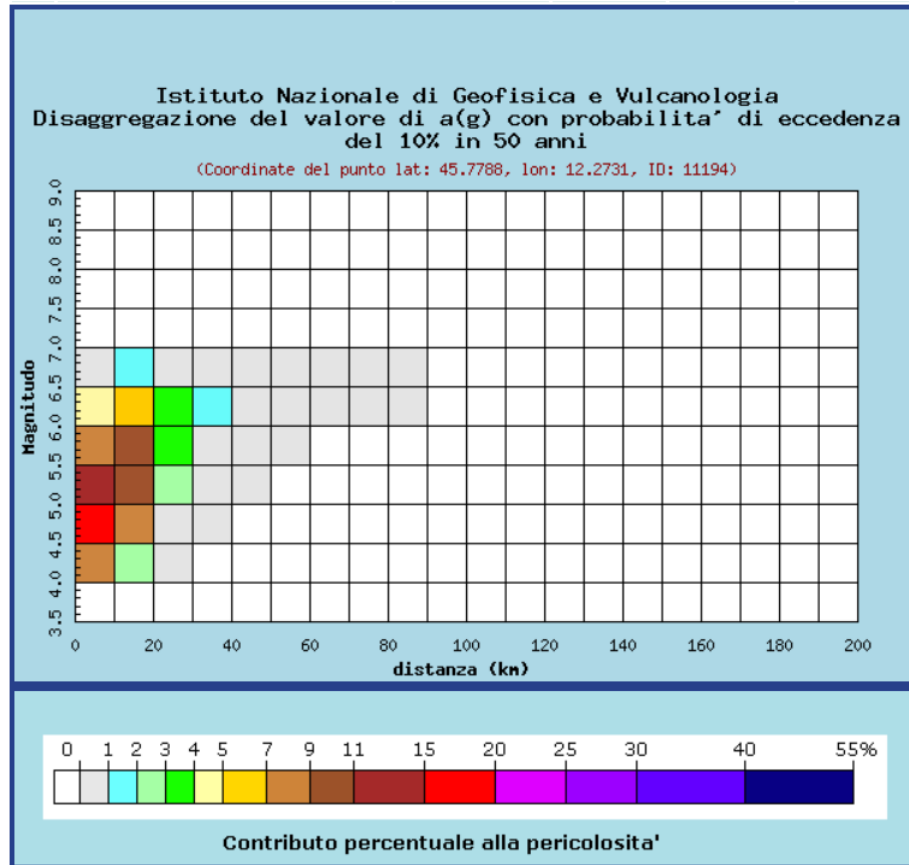


Fig. 22: analisi di disaggregazione del sito in esame (SLV)

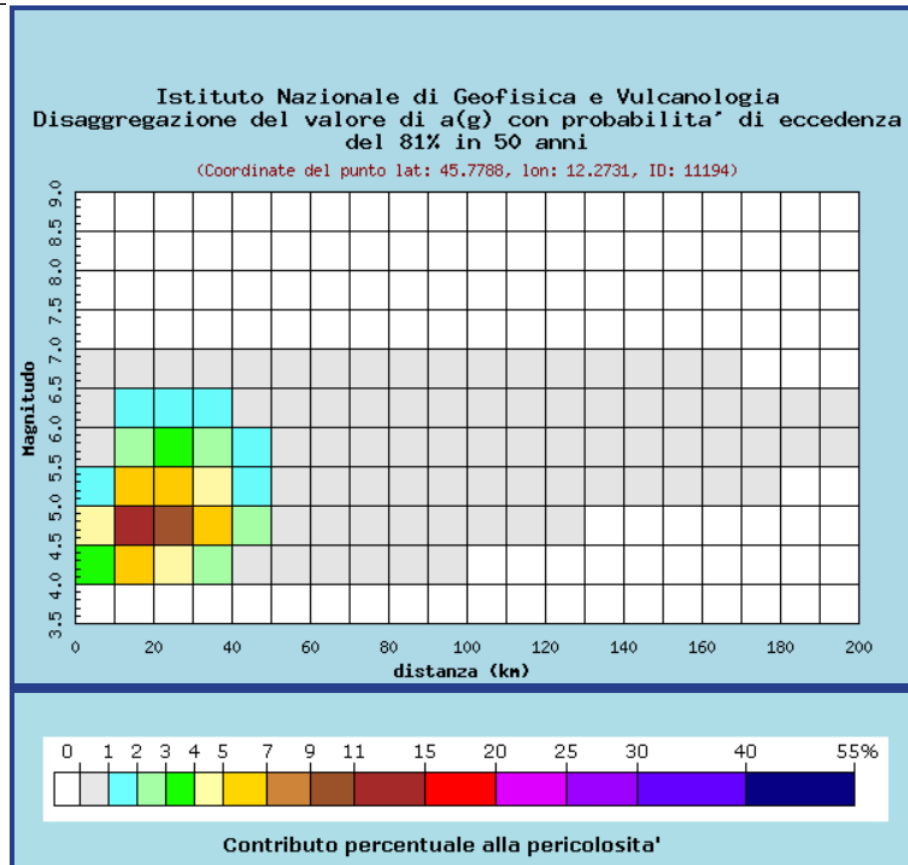


Fig. 23: analisi di disaggregazione del sito in esame (SLO)

5.2.4 Estrazione Input Sismici

Per studi di RSL è richiesta l'estrazione di 7 accelerogrammi di input spettro-compatibili. Il codice utilizzato per questa operazione è il Rexel beta 3.5 (Iervolino, Galasso, Cosenza), che permette l'estrazione degli accelerogrammi previa definizione di una serie di parametri:

- Target spectrum utilizzato: NTC2008, suolo tipo A
- I parametri di disaggregazione
- I parametri derivanti dalla scelta progettuale
- Le tolleranze max e min rispetto allo spettro target.

Seguendo questa procedura è stato estratto un set di 7 accelerogrammi (all. 3) con fattore di

scala medio pari a 1.27 e una magnitudo media pari a 6.2 per lo SLV, un fattore di scala medio pari a 1.41 e una magnitudo media pari a 6.0 per lo SLO.

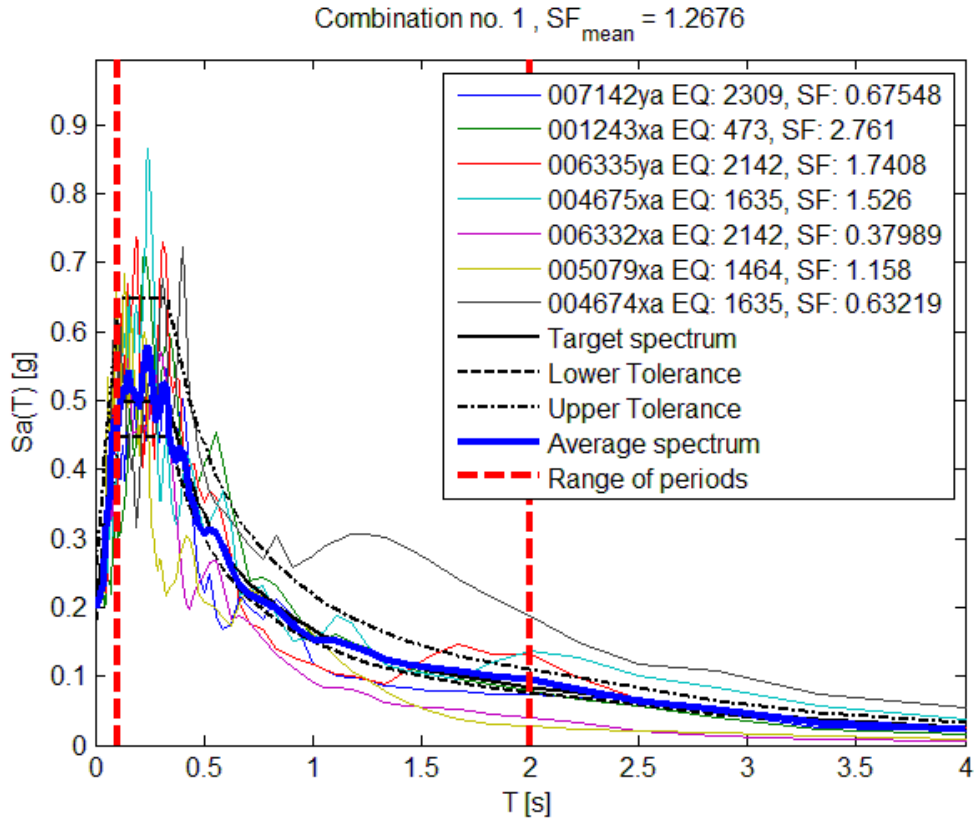


Fig. 24: Combinazione degli spettri dei sette accelerogrammi estratti (SLV).

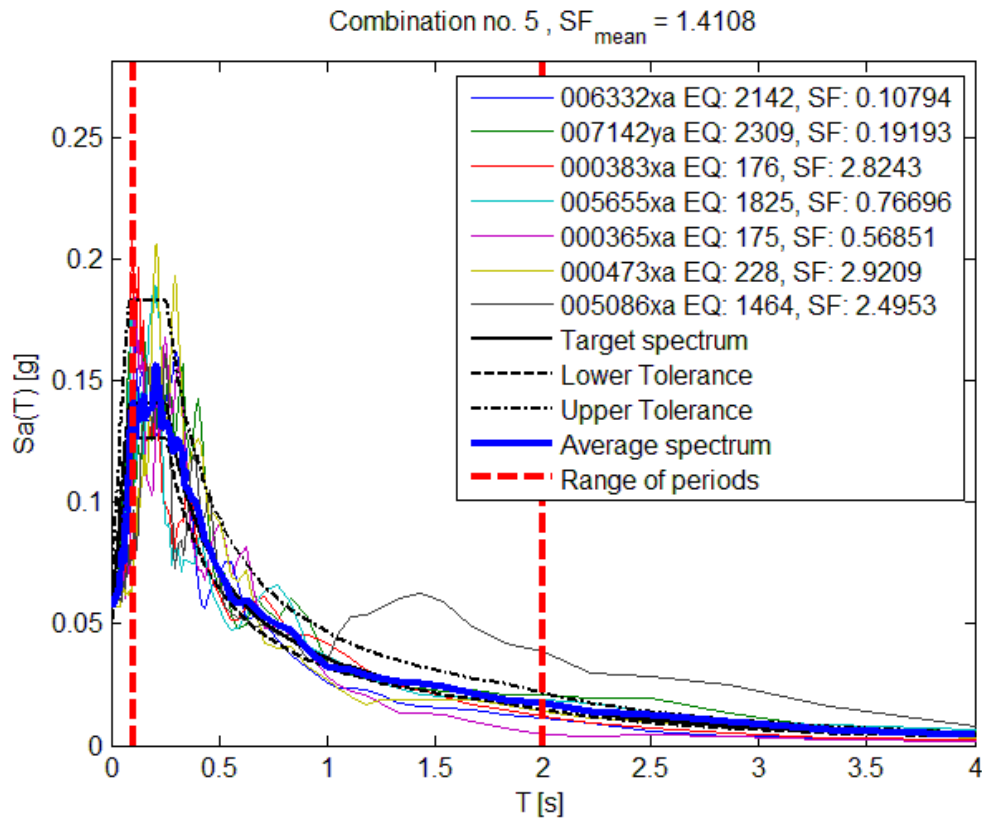


Fig. 25: Combinazione degli spettri dei sette accelerogrammi estratti (SLO).

5.2.5 Modello sismostratigrafico

Il modello sismostratigrafico, è stato ottenuto in base ai dati desunti dalle prove effettuate, che evidenziano un aumento graduale della velocità con la profondità. Il passaggio più marcato in termini di V_s , si trova a circa 4 m di profondità da p.c.. La massima profondità raggiunta dalle indagini (circa 40 m), non ha consentito di arrivare al bedrock sismico; per estrapolazione lineare si è ipotizzato dunque un bedrock avente $V_s=700$ m/s, alla profondità di 50 m. Inoltre, la stratigrafia del pozzo profondo Cusignana dell'Agip, evidenzia il passaggio dalle ghiaie al conglomerato del Montello, intorno ai 100 m dal p.c.

Per la determinazione del modello sismostratigrafico da utilizzare per il calcolo della RSL, si è fatto riferimento in particolare ai risultati della Masw.

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	Descrizione	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Strato (1)		4.20	1800.00	200.00	0.40	Sand Seed & Idriss (1970)
Strato (2)		20.80	1800.00	470.00	0.35	EPRI (93), 20-50 ft
Strato (3)		25.00	1900.00	600.00	0.30	EPRI (93), 50-120 ft

Tab. 4

Non essendo in possesso di prove dinamiche eseguite su campioni raccolti in sito (colonne risonanti, taglio ciclico, ecc...) che restituiscano le curve dinamiche G/Go e il Damping, si sono adottati modelli disponibili in bibliografia, **avendo comunque cura di sceglierli in base alle classificazioni disponibili effettuate sui campioni prelevati nei sondaggi.**

I tipi di suolo su cui si è basata l'analisi di RSL, sono riportati nella stessa tabella sopra riportata. In all. 2 sono riportate le rispettive curve di decadimento.

Per quanto concerne il bedrock, si è ipotizzata una densità di 22 kN/mc.

5.2.6 Analisi

L'analisi RSL è stata condotta con il software LSR-2D (Stacec), in modalità monodimensionale poiché siamo in presenza di una situazione piano parallela. Il metodo utilizzato è quello Lineare Equivalente con un rapporto di deformazione efficace pari a 0.56, desunto dalla nota relazione:

$$Ratio = \frac{M - 1}{10}$$

dove M = magnitudo di riferimento (6.6).

Il DampingFactor è pari al 5%. Secondo la nota formula:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55$$

$\eta = 1$ per un Damping pari al 5%.

Gli accelerogrammi di output, calcolati secondo l'opzione "outcrop" per il piano di posa in superficie, sono riportati in all. 3; in figg. 25 e 26 sono riportati gli spettri di risposta di output calcolati in superficie.

In sintesi i fattori di amplificazione, tenuto conto dei valori di PGA di input pari rispettivamente a 0.184 g (SLV) e a 0.049 g (SLO) risultano pari a:

$$FA (SLV) = 1.79$$

$$FA (SLO) = 1.79 .$$

Altri fattori di amplificazione calcolati secondo diversi periodi, sono:

$$FA_{0.1-0.5} = 1.68 (SLV) - 1.66 (SLO)$$

$$FA_{0.4-0.8} = 1.40 (SLV) - 1.33 (SLO)$$

$$FA_{0.7-1.1} = 1.18 (SLV) - 1.15 (SLO)$$

Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

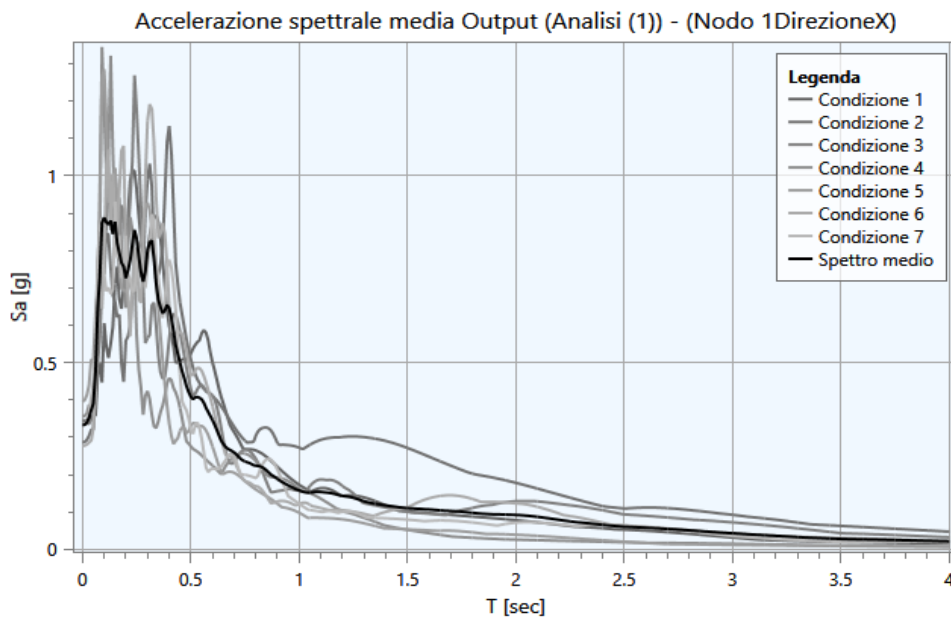


Fig. 25: Spettri di output (SLV).

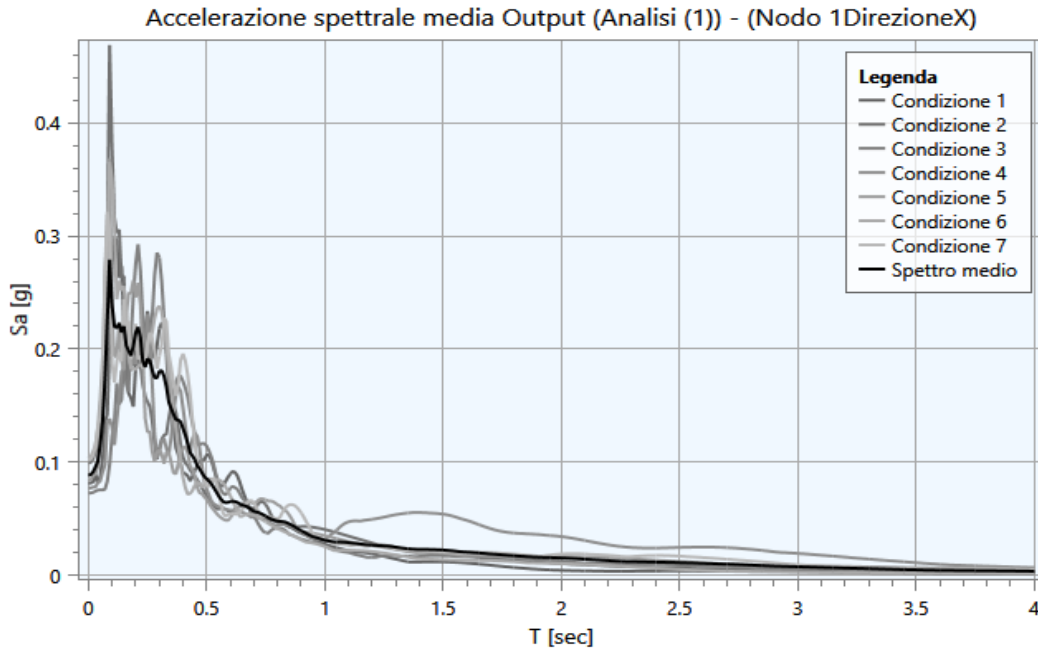


Fig. 26: Spettri di output (SLO).

Di seguito vengono riportati, per ogni analisi, i parametri degli spettri parametrizzati dell'area oggetto di studio.

Analisi SLV

<i>Punto di controllo</i>	<i>A_g [g]</i>	<i>F0</i>	<i>S</i>	<i>A_{max} [g]</i>	<i>T_b [sec]</i>	<i>T_c [sec]</i>	<i>T_d [sec]</i>
P (1)	0.184	2.703	1.552	0.286	0.101	0.302	2.336

Analisi SLO

<i>Punto di controllo</i>	<i>A_g [g]</i>	<i>F0</i>	<i>S</i>	<i>A_{max} [g]</i>	<i>T_b [sec]</i>	<i>T_c [sec]</i>	<i>T_d [sec]</i>
P (1)	0.049	2.737	1.513	0.074	0.086	0.257	1.796

dove:

- A_g : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$: valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- S : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- A_{max} : punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output;
- T_b : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_c : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- T_d : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

Nelle tabelle “Analisi SLV” e “Analisi SLO” sopra riportate, sono riportati i valori corrispondenti agli spettri normalizzati.

5.2.7 Verifica alla liquefazione

Le onde sismiche interagiscono con le particolari condizioni locali (caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno e ammassi rocciosi, e proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono) e questa interazione determina una specifica **risposta sismica locale** (insieme delle modifiche in termini di ampiezza, frequenza e durata che un moto sismico subisce propagandosi attraverso un deposito di materiali sciolti e degli spostamenti indotti dal moto ondoso nel deposito stesso) rispetto a quella che si avrebbe in un sito di riferimento ideale (rigido con piano campagna orizzontale). Siti con differenti condizioni locali manifestano differenti risposte sismiche ad uno stesso terremoto, ovvero uno stesso sito risponde in maniera diversa a terremoti differenti. Le modifiche del moto sismico prodotte dalle condizioni locali vengono indicate come **effetti di sito**.

Gli effetti di sito possono riguardare sia i terreni a comportamento sismico stabile, i quali sotto le sollecitazioni dinamiche si mantengono lontani dalla rottura e sono soggetti a deformazioni permanenti limitate, sia i terreni a comportamento instabile, che viceversa giungono a rottura e si deformano permanentemente in maniera significativa.

Nel primo caso si parla di effetti:

- stratigrafici = amplificazione delle sollecitazioni e del moto sismico, dovuta a fenomeni di risonanza tra onde sismiche e terreni causati principalmente dal contrasto di rigidità tra un basamento roccioso e di depositi di materiali sciolti sovrastanti;
- di bordo = risposta sismica ai margini di depositi di valle;
- topografici = modifiche delle caratteristiche del moto sismico causate da fenomeni di focalizzazione delle onde per effetto della configurazione topografica del terreno.

Nel secondo caso, per effetti di sito si intendono:

- liquefazione = riduzione della resistenza a taglio causata dall'aumento delle pressioni interstiziali in un terreno saturo granulare, tale da generare deformazioni permanenti significative o anche l'annullamento delle tensioni efficaci nel terreno;
- cedimenti per addensamento = cedimenti e deformazioni permanenti dei terreni a grana grossa non saturi causati dalle vibrazioni sismiche;
- cedimenti per riconsolidazione = cedimenti dovuti alla dissipazione delle sovrappressioni

interstiziali che si accumulano in un terreno fine soffice e plastico durante uno scuotimento sismico;

-instabilità dei versanti = perdita di equilibrio di un versante dovuto all'incremento delle azioni destabilizzanti (forze di inerzia proporzionali all'accelerazione sismica) ed alla riduzione delle azioni resistenti (decadimento della resistenza a taglio ed accumulo di pressioni interstiziali).

Per la valutazione quantitativa del fenomeno di liquefazione gli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" nonché le linee guida AGI (Associazione Geotecnica Italiana) "Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica" forniscono metodi specifici di calcolo ed elencano tutti i casi in cui è possibile escludere che si verifichi tale fenomeno, ovvero:

- Eventi sismici attesi di magnitudo inferiore a 5;
- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni free-field minori di 0.1g;
- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni free-field minori di 0.15 g e terreni ricadenti in una delle seguenti categorie:

-contenuto di fine superiore al 20% con indice di plasticità $IP > 10$;

-contenuto di fine superiore al 35% e resistenza $(N_{160}) > 20$

-frazione fine trascurabile e resistenza $(N_{160}) > 25$;

dove $(N_{160}) > 20$ valore della resistenza penetrometrica N_{SPT} misurato nel corso delle prova Standard Penetration Test, normalizzato;

- Profondità media stagionale della falda superiore ai 15m dal piano campagna;

•Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 28 (a) nel caso di materiale con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ ed in Figura 28(b) per coefficienti di uniformità $U_c > 3.5$.

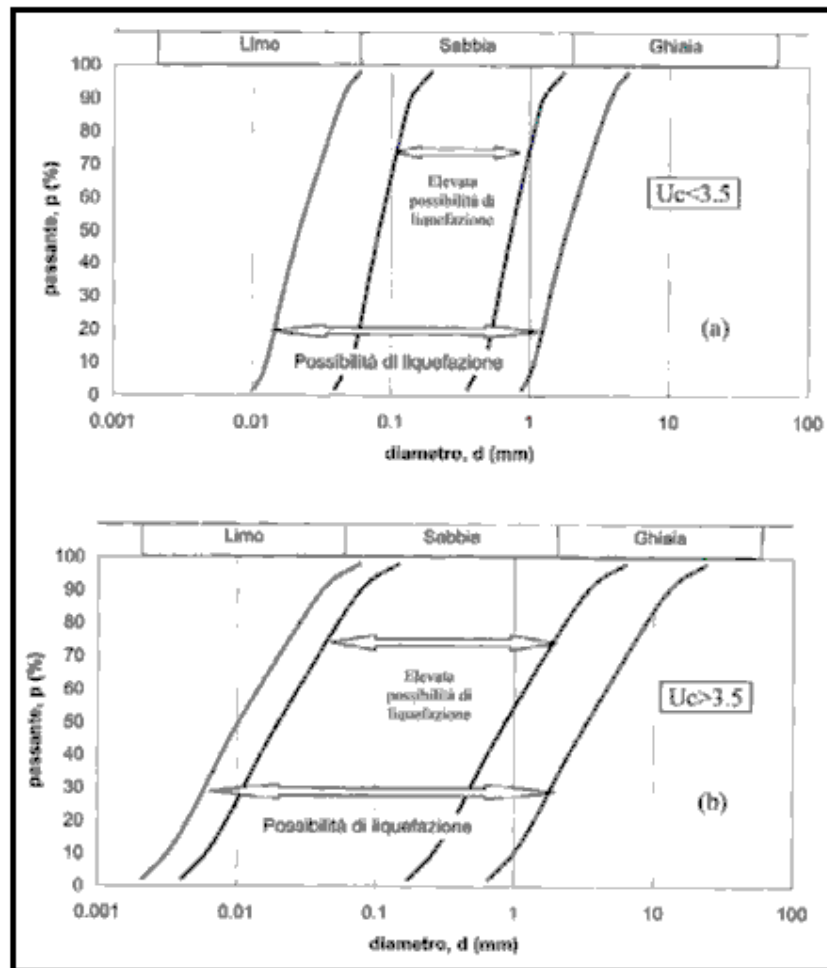


Fig.27 – Fusi granulometrici dei terreni suscettibili a liquefazione

Fatta questa premessa possiamo valutare se il sito in oggetto, o parte di esso, sia da sottoporre a verifica di liquefazione.

Come abbiamo visto nel paragrafo relativo alla sismicità storica, i terremoti attesi possono avere magnitudo superiori a 5, pur essendo il contributo percentuale alla pericolosità del sito derivante da terremoti con magnitudo > 5, piuttosto bassa.

Le accelerazioni attese sono sempre ampiamente sopra la soglia riportata nelle linee guida della Protezione Civile.

Per quanto concerne i dati granulometrici e lo stato di addensamento dei depositi alluvionali, pur non essendovi molti riscontri, è possibile fare le seguenti considerazioni:

- sono frequenti lenti sabbiose e sabbiose limose, talvolta con spessori metrici;
- il grado di addensamento è talvolta compatto pur risultando < 20 (sono frequenti valori $N_{160} < 20$);
- la falda è presente a quote inferiori a 15m da p.c.

E' dunque opportuno condurre delle relative al potenziale di liquefazione, che si baseranno sulle velocità V_s misurate nel corso delle indagini geofisiche condotte.

Per quanto concerne i dati di base, per il calcolo si farà riferimento alle condizioni più penalizzanti riscontrate:

- accelerazione di picco pari a 0.286 g;
- velocità $V_s = 400$ m/s (velocità minima misurata della coltre detritica immersa in acqua mediante Masw)
- Magnitudo di riferimento $M_w = 6.6$
- Profondità della falda 5 m da p.c.
- Suolo tipo B;
- Categoria topografica T1

La verifica è stata eseguita supponendo la presenza di una percentuale di limo e/o argilla massima pari al 5%.

Viene calcolato il coefficiente di sicurezza (previa una “normalizzazione” dei dati ottenuti per riportarli alla magnitudo di riferimento):

$$F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5}$$

dove:

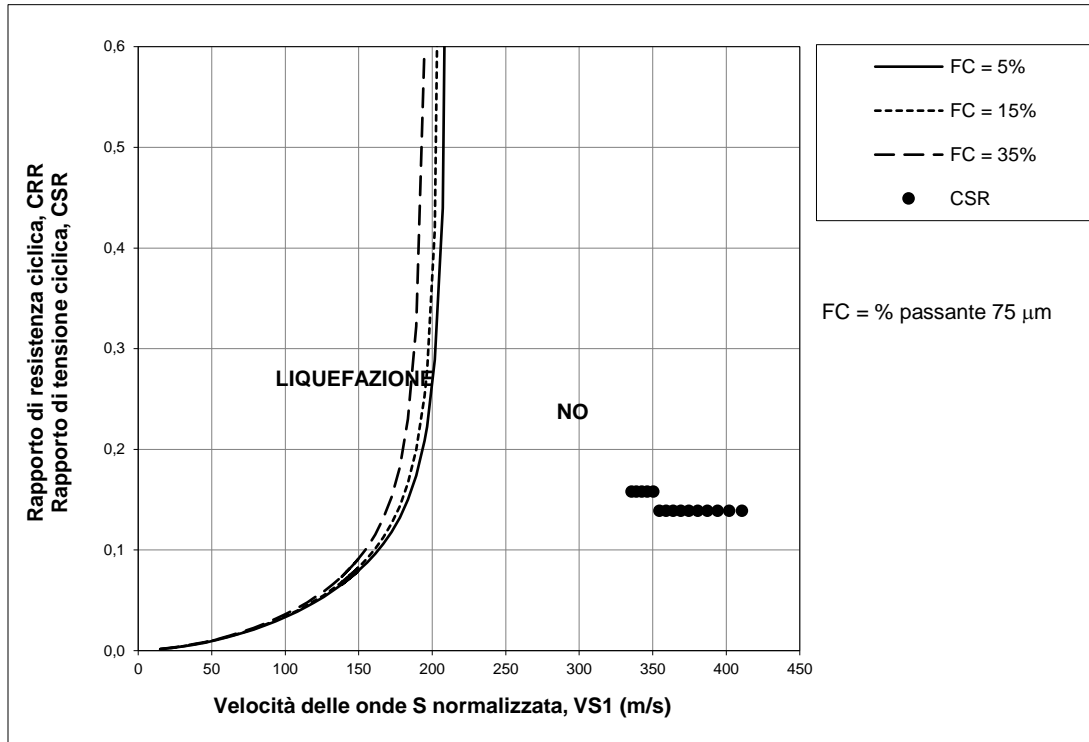
$CRR_{7.5}$ = rapporto di resistenza ciclica (per $M=7.5$)

$CSR_{7.5}$ = rapporto di tensione ciclica (per $M=7.5$)

I risultati ottenuti (vedere grafico e tabella di fig.28) indicano che per tali livelli non sussiste.

VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

profondità (m)	Vs	Vs1	CSR 7.5	$F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5}$
5.0	400	411	0.139	5.82
6.0	400	402	0.139	2.94
7.0	400	394	0.139	2.76
8.0	400	387	0.139	2.60
9.0	400	381	0.139	2.47
10.0	400	375	0.139	2.36
11.0	400	369	0.139	2.25
12.0	400	364	0.139	2.16
13.0	400	359	0.139	2.08
14.0	400	355	0.139	2.00
15.0	400	350	0.158	1.70
16.0	400	346	0.158	1.64
17.0	400	343	0.158	1.59
18.0	400	339	0.158	1.54
19.0	400	336	0.158	1.50



1.412
1.374
1.338

La velocità delle onde sismiche viene ricondotta ad un valore V_{s1} , ovvero ad un valore normalizzato ad una tensione efficace $p_a = 100$ kPa attraverso la:

$$V_{s1} = C_v \cdot V_s = V_s \cdot (p_a / \sigma'_{v0})^{0.25}$$

RAPP. TENSIONALE CICLICO $CSR = \tau_{media} / \sigma' = 0.65 \cdot (a_{max} / g) \cdot (\sigma_v / \sigma'_v) \cdot r_d$

a_{max} = accelerazione di picco al piano campagna

g = accelerazione di gravità

σ_v / σ'_v = tensione totale ed efficace nel sottosuolo

r_d = coefficiente riduttivo dell'azione sismica alla profondità d'interesse che tiene conto della deformabilità del sottosuolo

COEFFICIENTE DI SICUREZZA ALLA LIQUEFAZIONE $F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5}$

CSR riferito ad terremoto di magnitudo 7.5 $(CSR)_{M=7.5} = (CSR)_M / MSF$

fattore di scala per la magnitudo $MSF = 6.9 \cdot \exp(-M/4) - 0.058$

RAPP. DI RESISTENZA CICLICA (riferito a $M = 7.5$) $CRR_{7.5} = 0.022x(V_{s1}/100)^2 + 2.8x(1/(V_{s1}^* - V_{s1}) - 1/V_{s1}^*)$

In base ai dati ottenuti dalle prove geognostiche condotte, dall'indagine MASW e dal valore della a_g in superficie ottenuto dallo studio della RSL, si è proceduto alla verifica a liquefazione per i livelli con sabbia incontrati fino alla profondità di 20 m da p.c., così come previsto dalle linee guida AGI (secondo il metodo Idriss e Boulanger, 2004). Si sono utilizzate le velocità V_s misurate e si è supposta la presenza di una percentuale di limo e/o argilla $< 5\%$, nonché una magnitudo di riferimento $M = 6.6$.

Viene calcolato il coefficiente di sicurezza (previa una "normalizzazione" dei dati ottenuti per riportarli alla magnitudo di riferimento):

$$F_s = CRR_{7.5}/CSR_{7.5}$$

dove:

$CRR_{7.5}$ = rapporto di resistenza ciclica (per $M=7.5$)

$CSR_{7.5}$ = rapporto di tensione ciclica (per $M=7.5$). Valore ottenuto dall'analisi di RSL condotta. Nella figura che segue si riporta il profilo di CSR risultante dall'analisi.

Come si può osservare NON esiste un reale rischio di liquefazione.

6. CONCLUSIONI FINALI

Lo studio di approfondimento di III livello, effettuato in ottemperanza alle richieste contenute nel parere di cui al prot. 127779/88 del 19/03/2021, ha consentito di escludere la presenza della faglia potenzialmente attiva e capace nel sedime dell'area oggetto di indagine, grazie all'esecuzione di una linea tomografica elettrica con direzione N-S.

Inoltre, grazie all'esecuzione di indagini sismiche, è stato possibile definire una sismostratigrafia atta a impostare un modello numerico per il calcolo delle amplificazioni di sito

secondo due stati limite: SLO e SLV.

In linea di massima le accelerazioni calcolate presentano dei valori di picco superiori a quanto si otterrebbe con gli approcci semplificati, ma limitati a periodi molto più contenuti.

In allegato si riportano anche gli spettri di risposta in formato digitale per un opportuno utilizzo in sede di calcolo strutturale.

Rovigo, Maggio 2021

Dott. Geol. Enrico Farinatti



ALLEGATI